

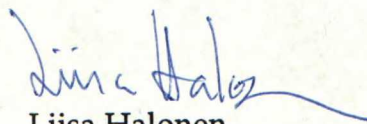
TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkötekniikan osasto

Timo Häyrynen

HÄIKÄISYN ARVOSTELUMENETELMIEN SOVELTAMINEN
SISÄTILOJEN VALAISTUKSEN ARVOSTELUUN

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 11.10.1994.

Työn valvoja


Liisa Halonen
Apulaisprofessori

19494

TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

Tekijä: Timo Häyrynen

Työn nimi: Häikäisyn arvostelumenetelmien soveltaminen sisätilojen valaistuksen arvosteluun

Päivämäärä: 11.10.1994

Sivumäärä: 102

Osasto: Sähkötekniikan osasto

Professori: S-18 Sähkölaitokset

Työn valvoja: Apulaisprofessori Liisa Halonen

Työn ohjaaja: –

Työssä on esitetty kiusa- ja estohäikäisyyteen liittyvät perusyhtälöt ja menetelmät, niiden kehitysvaiheet sekä nykyisin käytössä olevat muodot. Lisäksi on esitetty toimistotiloissa tehtyjen häikäisymittausten tulokset ja vertailtu eri menetelmillä saatuja tuloksia toisiinsa sekä työpaikkakyselyn tuloksiin, joka tehtiin mittausten yhteydessä.

Kiusahäikäisyn arviointimenetelmät perustuvat häikäisy-yhtälöön, joka on ensin johdettu fysikaalisin perustein ja sitten tarkennettu koehenkilöiden avulla tehtyjen tutkimusten antamien tulosten perusteella. Häikäisy-yhtälön parametreja ovat häikäisylähteen luminanssi, avaruuskulma ja sijaintikerroin sekä koko näkökentän keskimääräinen luminanssi. Kiusahäikäisystä on esitetty kolme menetelmää, joita käytetään yleisesti eri puolilla maailmaa. Menetelmät ovat VCP-, BGI- ja luminanssi-käyrämenetelmä, joista mittauksiin on valittu VCP-menetelmä ja BGI-menetelmästä edelleen kehitetty UGR-menetelmä.

Estohäikäisyn arviointimenetelmät perustuvat silmän fysikaaliseen mallintamiseen ja ainoa erottava tekijä on harsoluminanssin määrittäminen, joka voidaan tehdä joko erityisen häikäisylinssin tai Adrianin luminanssidiagrammin avulla. Harsoluminanssi heikentää silmän verkkokalvolle syntyvää kontrastia ja siihen vaikuttavat häikäisylähteen luminanssin lisäksi koko taustan luminanssi sekä tarkastelijan ikä silmän optisen rakenteen muutosten kautta. Harsoluminanssia on mitattu sekä häikäisylinssillä että luminansseina.

Avainsanat: kiusahäikäisy, estohäikäisy, tilastollinen näkömukavuus, häikäisyindeksi, UGR, luminanssi, ekvivalentti harsoluminanssi

Author:	Timo Häyrynen		
Name of the thesis:	Applying glare evaluation systems in assessment of interior lighting		
Date:	11th October, 1994	Number of pages:	102
Faculty:	Electrical Engineering		
Professorship:	S-18 Power Systems		
Supervisor:	Associate professor Liisa Halonen		
Instructor:	-		
<p>The fundamental formulas and systems for assessment of discomfort and disability glare are dealt with in this thesis. Also the development and today's forms of these systems are shown. Glare measurements have been carried out in real office rooms and these results have been handled with different glare evaluation systems. The results given by different systems have been compared with each other. In addition, the results of a questionnaire answered by the people working in the office rooms were compared to the results of different glare evaluation systems.</p> <p>Discomfort glare evaluation systems base on a glare formula, which was first acquired by using laws of physics and then focused with help of results of researches using people to evaluate glare by using verbal and numerical scales. The parameters of the glare formula are luminance, solid angle and position index of glare source and background luminance. Three major glare evaluation systems are described in this thesis. They are the VCP-system, the BGI-system and the luminance curve method. Measurement results were handled with the VCP-system and with the UGR-system, which has been developed from the BGI-system.</p> <p>Disability glare evaluation methods base on physical modelling of the eye and the only difference between the methods is the measurement of the equivalent veiling luminance. The measurement can be done by using either a glare lens or a luminance diagram. The veiling luminance reduces the contrast of the retina. The veiling luminance is caused by the background luminance and the age of an observer in addition to the luminance of the glare source. Both measurement methods are used in this thesis.</p>			
Keywords:	discomfort glare, disability glare, visual comfort probability, glare index, unified glare rating, luminance, equivalent veiling luminance		

Alkulause

Tämä diplomityö on tehty opinnäytteeksi TKK:n Sähkötekniikan osastolle apulaisprofessori Liisa Halosen johdolla. Lausun hänelle lämpimät kiitokset mahdollisuudesta tehdä työ Sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratoriossa sekä innostavasta suhtautumisesta ja ohjauksesta niin diplomityön tekemisen kuin aikaisemmankin opiskelun aikana.

Erityiskiitokset kuuluvat Marjukka Eloholmalle häikäisymittausten käytännön järjestelyistä ja Esa Kurhiselle avustamisessa näissä mittauksissa. Petteri Palmille kiitokset neuvoista työn saamiseksi julkaisukuntoon ja koko muulle Sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratorion henkilökunnalle kannustavasta ilmapiiristä ja erinäisistä neuvoista.

Lukuisille TKK:n työntekijöille ja Näkövammaisten keskusliiton vapaaehtoisille kiitokset osallistumisesta työpaikkakyselyihin.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani Liisa ja Kyösti Häyrystä niin henkisestä kuin taloudellisesta tuesta opiskelujeni aikana.

Espoossa lokakuun 11. päivänä 1994



Timo Häyrynen

Sisällysluettelo

	sivu
Diplomityön tiivistelmä.....	1
Abstract of the master's thesis	2
Alkulause	3
Sisällysluettelo.....	4
Käytetyt symbolit ja lyhenteet	6
 Johdanto	 9
 1 Kiusahäikäisy	 10
1.1 Häikäisynarvostelujärjestelmien kehitys	11
1.1.1 Amerikkalainen järjestelmä	12
1.1.2 Brittiläinen järjestelmä	13
1.1.3 Keskieurooppalainen järjestelmä	16
1.1.4 Häikäisynarvostelujärjestelmien vertailua	24
1.2 CIE:n työ vuoden 1971 jälkeen	26
1.2.1 UGR-häikäisynarvostelujärjestelmä	29
1.3 Standardointi Euroopassa	30
1.4 VCP-menetelmä	31
1.5 VCP-mittaukset toimistotiloissa	34
1.6 UGR-menetelmä	37
1.6.1 UGR-yhtälö ja sen perusominaisuudet	37
1.6.1.1 Huoneen vaikutus	38
1.6.1.2 Valaistusasennuksen vaikutus	39
1.6.1.3 Valaisinten ominaisuuksien vaikutus	39
1.6.2 Valaisinkohtaiset UGR-taulukot	40
1.6.3 Standardi-UGR-taulukot	43
1.6.4 UGR-käyrät	46
1.7 UGR-mittaukset toimistotiloissa	51
1.8 Yhteenvedo kiusahäikäisyn arviointimenetelmistä	53
 2 Estohäikäisy	 56
2.1 Häikäisykulman eksponentti	58
2.1.1 Adrianin diagrammi	59
2.2 Iän vaikutus	61
2.3 Taustaluminanssin vaikutus	62

2.4	Estohäikäisymittaukset toimistotiloissa	63
2.5	Johtopäätökset.....	64
3	Pohdintoja kiusa- ja estohäikäisyn yhdistämisestä.....	66
4	Yhteenveto häikäisyn arviointimenetelmistä	67
	Lähdeluettelo.....	68
	Liitteet.....	72
	Liite 1: Sijaintikerroin kulmien σ ja τ funktiona.....	72
	Liite 2: Kaavio VCP:n graafiseen määrittämiseen.....	73
	Liite 3: Mittaustilat.....	74
	Liite 4: Mittausmenetelmät ja -laitteet	89
	Liite 5: Kiusahäikäisymittaustulokset.....	92
	Liite 6: Estohäikäisymittaustulokset	99

Käytetyt symbolit ja lyhenteet

Roomalaiset aakkoset, kreikkalaiset aakkoset sekä käytetyt lyhenteet

Roomalaiset aakkoset:

A	ikä
a	silmän ja häikäisylähteen välinen vaakasuora etäisyys
b_ϕ	valovirran korjaustekijä
b_L	taustaluminanssin huomioonottava korjaustekijä
C	kontrasti
C_{seq}	kontrasti, jossa otetaan huomioon ekvivalentin harsoluminanssin (L_{seq}) vaikutus
c	$n^{-0,0914}$
D	estohäikäisyn aste
E	valaistusvoimakkuus
E_d	kiasahäikäisy-yhtälössä käytetty suora valaistusvoimakkuus silmän kohdalla pystysuoralla tasolla
E_{gl}	estohäikäisy-yhtälössä käytetty suora valaistusvoimakkuus silmän kohdalla pystysuoralla tasolla
E_i	silmän verkkokalvolle tuleva epäsuora valaistusvoimakkuus
F	koko näkökentän keskimääräinen luminanssi
ΔG	häikäisyluvun muutos
G	häikäisyluku
$G_{de Boer}$	de Boerin häikäisyluku
G_{total}	brittiläisen järjestelmän häikäisyluku
H, h_s	valaisimen ja silmän välinen korkeus
h_m	valaisimen korkeus työtasosta
i, j	kiasahäikäisy-yhtälön eksponentit
k	estohäikäisy-yhtälön kerroin

k_r	huoneindeksi
k_{rel}	iän huomioon ottava estohäikäisy-yhtälön kerroin
L	luminanssi
l	huoneen pituus
L_A	sopeutumisluminanssi
L_b	taustan luminanssi
L_c	katon keskimääräinen luminanssi
L_f	lattian keskimääräinen luminanssi
L_R	suhteellinen taustaluminanssi
L_s	häikäisylähteen luminanssi
L_{seq}	ekvivalentti harsoluminanssi
$L_{seq,h}$	häikäisylähteiden aiheuttama harsoluminanssi
$L_{seq,t}$	taustan aiheuttama harsoluminanssi
L_t	näkökohteen luminanssi
L_w	seinien keskimääräinen luminanssi
M	häikäisylähteen aistimuseindeksi
m	estohäikäisy-yhtälön eksponentti
n	häikäisylähteiden lukumäärä
p	häikäisylähteen sijaintikerroin
X	huoneen leveys UGI-taulukossa
Y	huoneen pituus UGI-taulukossa

Kreikkalaiset aakkoset:

γ	katsekulma (silmän kohdalla olevan pystysuoran tason ja silmän sekä häikäisylähteen välisen suoran välinen terävä kulma)
ΔG	häikäisyluvun muutos
ϕ	lampun tuottama valovirta
ϕ_0	valmistajan taulukossa esitetty lampun valovirta
φ	näkökentän koko asteina
φ_1	näkökentän keskialueen peittämä kulma
φ_2	näkökentän keskipisteen ja yläreunan välinen kulma

θ	näkökohteen ja häikäisylähteen keskipisteen välinen kulma, jonka kärki on silmän kohdalla
σ	katsesuunnan sekä tarkastelijan ja häikäisylähteen välisen suunnan kulma
τ	pystysuoran tason sekä häikäisylähteen ja katsesuunnan sisältävän tason välinen kulma
ω	häikäisylähteen avaruuskulma
ω_c	katon avaruuskulma
ω_f	lattian avaruuskulma
ω_w	seinien avaruuskulma

Lyhenteet:

BGI	brittiläinen häikäisyindeksi (British Glare Index)
BGI _{Hopkinson}	Hopkinsonin häikäisyindeksi
BZ	brittiläinen sisävalaistuksen laskentamenetelmä (British Zonal Method)
CGI	CIE:n häikäisyindeksi (CIE Glare Index)
DGR	kiusahäikäisyn aste (Discomfort Glare Rating)
GI _{de Boer}	de Boerin häikäisyindeksi (Glare Index)
NB	pohjoismainen sisävalaistuksen laskentamenetelmä (Nordisk Belysnings Beregningsmetode)
UF _{tot}	valaistushyötysuhde (Utilization Factor)
UF _d	suoran valaistuksen hyötysuhde
UGI	taulukoissa esitettävä korjaamaton häikäisyindeksi (Uncorrected Glare Index)
UGR	Sørensenin häikäisyindeksi (Unified Glare Rating)
VCP	tilastollinen näkömukavuus (Visual Comfort Probability)

Johdanto

Häikäisyn tieteellinen tutkimus alkoi jo noin 150 vuotta sitten, mutta varsinaisesti siihen on alettu paneutua vasta loistelamppujen ja sitä kirkkaampaa valoa tuottavien valonlähteiden keksimisen jälkeen 1950-luvulta alkaen.

Kuitenkin jo 1920-luvulla englantilainen Stiles tutki häikäisyn luonnetta ja päätyi siihen johtopäätökseen, että on olemassa kahdenlaista häikäisyä, eli kiusahäikäisyä ja estohäikäisyä. Hänen mukaansa kiusahäikäisy on häikäisyä, joka aiheuttaa epämiellyttävän tunteen, mutta ei välttämättä heikennä näkemistä ja estohäikäisy on häikäisyä, joka heikentää näkemistä, mutta ei välttämättä aiheuta epämiellyttävyyden tunnetta. Tämän jälkeen häikäisytutkimus jakautui kahtia.

Kiusahäikäisyn tutkimuksessa on saatu aikaan useita erilaisia arvostelumenetelmiä, joista osaa käytetään nykyisinkin sisätilojen valaistuksen kansallisten suositusten perustana. Tässä työssä tutkitaan ja vertaillaan keskenään näistä menetelmistä yleisimpiä. Käyttökelpoisuutta ja luotettavuutta testataan myös käytännön mittauksissa, joita on suoritettu todellisissa toimistotiloissa. Mittauksien yhteydessä on tehty mitattavien tilojen työntekijöiden haastattelut, joissa on selvitetty työntekijöiden kokemaa häikäisyä.

Estohäikäisytutkimus on edennyt sopuisammin kuin kiusahäikäisytutkimus, mutta toisaalta mielenkiinto estohäikäisyyn nimenomaan sisätiloissa on ollut melko laimeaa. Tutkimus onkin keskittynyt lähinnä tie- ja tunnelivalaistuksen aiheuttamaan häikäisyyn. Tässä työssä käsitellään kuitenkin estohäikäisyä sisätiloissa ja tutkitaan, kannattaako sitä ottaa huomioon sisätiloissa.

Lopuksi pohditaan, olisiko kiusa- ja estohäikäisyä mahdollista yhdistää niin, että saataisiin aikaan menetelmä, joka ottaisi huomioon molempien häikäisytyyppien vaikutuksen näkemiseen.

1 Kiusahäikäisy

Kiusahäikäisy on häikäisyä, joka aiheuttaa epämukavuutta näkemisessä ilman, että näkökyky heikkenee (SFS-IEC 50, määritelmä 845-02-56).

Kiusahäikäisyä esiintyy tilanteissa, joissa on korkeita luminansseja ja taustaluminanssi on matala. Häikäisyä tuottaa useimmiten liian kirkkaan ja riittämättömästi suojatun tai liian laajan valonlähteen suora häikäisy.

Ensimmäiset huomionarvoiset tutkimukset häikäisystä tehtiin 1920-luvulla. Yhdysvalloissa Holladay kehitti kuuluisan häikäisy-yhtälönsä ja Englannissa Stiles erotti ensimmäistä kertaa kiusa- ja estohäikäisyn toisistaan.

Tämän päivän häikäisynarvostelujärjestelmiin johtaneen perustutkimuksen alkua saatiin kuitenkin odottaa siihen asti, kun noin 50 vuotta sitten kehitettiin loistelamppu. Hyvin pian tämän jälkeen huomattiin, että suojaamattomat loistelamput aiheuttivat epämukavuutta, etenkin poikittaissuunnassa. Tämä oli syy siihen, että tutkijat eri puolilla maailmaa alkoivat tutkia kiusahäikäisyä. Näitä tutkimuksia on tehty kahdessa eri pääluokassa:

- Häikäisyn kokemiseen liittyvät perusmekanismit ja niiden vaikutukset ihmiseen. Tätä aihetta käsitellään CIE:n 1. työryhmässä TC 1-25 "Fundamentals of Discomfort Glare".
- Häikäisyn ja valaistusasennuksen fotometrinen ja geometrinen ominaisuuksien välisen empiirisen suhteen tutkiminen ja häikäisynarvostelujärjestelmän kehittäminen. Tätä aihetta käsitellään CIE:n 3. työryhmässä TC 3-13 "CIE Discomfort Glare Evaluation System".

Häikäisyn kokemisen tutkiminen ei ole toistaiseksi tuottanut pidemmälle menevää ymmärtämystä siitä, mitä kiusahäikäisy todella on.

Häikäisyn fotometrinen ja geometrinen ominaisuuksien tutkimuksen pioneereja olivat S. K. Guth Yhdysvalloissa, R. G. Hopkinson Englannissa ja J. B. de Boer Hollannissa. He aloittivat yhden häikäisylähteen aiheuttaman kiusahäikäisyn asteen subjektiivisella arvioinnilla. He havaitsivat, että kiusahäikäisyn ja neljän siihen vaikuttavan tärkeimmän tekijän suhde voidaan esittää seuraavan yhtälön avulla:

$$G = \frac{L_s^i \cdot \omega^j}{L_b \cdot p^i} \quad (1)$$

jossa G = häikäisyluku
 L_s = häikäisylähteen luminanssi [cd/m^2]
 L_b = taustan luminanssi [cd/m^2]
 ω = häikäisylähteen avaruuskulma [sr]
 p = sijaintikerroin.

Empiiristen tutkimusten perusteella on saatu eksponenteille i ja j taulukon 1 mukaisia arvoja.

Taulukko 1. Tutkijoiden määrittämiä häikäisy-yhtälön eksponenttien i ja j arvoja.

Tutkijat	Vuosi	i	j
Vermeulen & de Boer /1/	1948	1,7	0,5
Luckiesh & Guth /2/	1949	2,3	0,8
Petherbridge & Hopkinson /3/	1950	1,6	0,8

Eksponenttien välisiä eroja voidaan selittää tutkimusmenetelmissä olleiden erojen perusteella. Esimerkiksi Guthin mittauksissa koehenkilöä häikäistiin kolme kertaa peräkkäin 1 sekunnin ajan, jolloin välissä ollut tauko oli myös 1 sekunti, kun taas eurooppalaisten tutkimuksissa käytettiin jatkuvaa häikäisyä, jolloin koehenkilölle jäi aikaa sopeutua paremmin häikäisytilanteisiin.

1.1 Häikäisynarvostelujärjestelmien kehitys

Häikäisytutkimuksen alkuaikoina hankaluutena oli yhteisen yhtälön aikaansaaminen, joka olisi toiminut perustana kansainväliselle häikäisynarvostelujärjestelmälle. Vuonna 1951 perustettiin tätä tarkoitusta varten CIE:hen komitea "Estimation of Comfort in Lighting".

Häikäisy tutkimuksen veteraanit olivat kuitenkin kaikki niin vakuuttuneita omien tutkimustensa oikeellisuudesta, etteivät olleet valmiita muuttamaan omia kantojaan yhteisen yhtälön luomiseksi. S. K. Guth toimi CIE:n häikäisykomitean puheenjohtajana vuosina 1955 – 1971. Tämän komitean selkeänä tehtävänä oli ”kehittää arvostelu- ja kontrollimenetelmä, joka olisi kansainvälisesti hyväksyttävissä”. Tästä huolimatta yleisesti hyväksytyn menetelmän kehittämiseksi ei nähty todellista vai-
vaa, vaan sen sijaan syntyi kolme erilaista häikäisyn arvostelumenetelmää, jotka esitellään luvuissa 1.1.1, 1.1.2 ja 1.1.3.

1.1.1 Amerikkalainen järjestelmä

S. K. Guth kehitti amerikkalaista järjestelmää ja sai vuoteen 1971 mennessä valmiiksi Visual Comfort Probability eli VCP-menetelmänsä /4/. VCP:tä nimitetään Suomessa tilastolliseksi näkömukavuudeksi. Guthin mittaukset käsittelivät yhden häikäisylähteen tuottamaa kiusahäikäisyyä, joka määritettiin mukavan ja epämukavan luminanssin rajan perusteella (Borderline between Comfort and Discomfort; BCD). Guth esitti melko pitkälle kehitetyn summayhtälön, jossa eksponentti c oli häikäisylähteiden määrän funktio ja M aistimusindeksi, joka kuvaa häikäisylähteen aiheuttamaa kiusahäikäisyn tunnetta:

$$DGR = (\sum M)^c \quad (2)$$

jossa DGR = kiusahäikäisyn aste (Discomfort Glare Rating)

M = yksittäisen häikäisylähteen aistimusindeksi (Glare Sensation Index)

$c = n^{-0,0914}$

n = häikäisylähteiden lukumäärä.

DGR -arvo voidaan muuntaa VCP:ksi yhtälön 14 avulla. VCP kuvaa prosentuaalisesti kyseessä olevaan valaistusjärjestelmään tyytyväisten ihmisten lukumäärän. IES:n mukaan /4/ kun VCP on vähintään 70, voidaan valaistusta pitää hyväksyttävänä kouluissa ja toimistotiloissa. Tällöin siis 70% ihmisistä on tyytyväisiä valaistukseen, minkä katsotaan olevan riittävä määrä.

VCP:n muutoksen alimpana havaitsemisrajana pidetään 5 prosenttiyksikön muutosta. Jos häikäisylähteen luminanssi kaksinkertaistuu muiden olosuhteiden pysy-

essä ennallaan, DGR:n arvo kaksinkertaistuu. Koska VCP ei ole lineerisesti riippuva DGR:stä, ei tästä voi suoraan päätellä VCP:n muutosta. Liitteessä 2 esitetyn kaavion mukaan suurilla DGR:n arvoilla VCP:n muutos on varsin pieni, mutta DGR:n arvosta 200 alaspäin mentäessä VCP:n muutos alkaa merkittävästi jyrkentyä. Toimistolosuhteissa ($VCP \approx 90$) valaisimen luminanssin kaksinkertaistuminen voi pudottaa VCP:n arvoa jopa 30 prosenttiyksiköllä, joka on merkittävä heikennys.

VCP-menetelmää käsitellään tarkemmin luvussa 1.4.

1.1.2 Brittiläinen järjestelmä

Hopkinson esitteli vuonna 1961 CIE:n komitealle häikäisyindeksiin perustuvan häikäisynarvostelujärjestelmän (British Glare Index System; BGI tai GI) /5/. Se perustui häikäisyn subjektiiviseen arvosteluun neljän tunteen mukaan:

- lähes sietämätön
- melko epämiellyttävä
- lähes hyväksyttävä
- juuri havaittava.

Petherbridgen ja Hopkinsonin aikaisempaan tutkimukseen /3/ oli osallistunut kuusi henkilöä, joilla oli valmiudet tehdä luotettavia subjektiivisia arvioita. BGI-järjestelmän summayhtälössä kunkin häikäisylähteen aiheuttama häikäisy lasketaan yhteen, jolloin saadaan kaikkien häikäisylähteiden yhteisvaikutus.

$$G_{\text{total}} = \sum \frac{L_s^{1,6} \cdot \omega^{0,8}}{L_b \cdot p^{1,6}} \quad (3)$$

jossa G_{total} = häikäisyluku

L_s = häikäisylähteen luminanssi [cd/m^2]

L_b = taustan luminanssi [cd/m^2]

ω = häikäisylähteen avaruuskulma [sr]

p = sijaintikerroin.

Koska ottamalla kymmenkantainen logaritmi häikäisystä (G_{total}) saadaan sopivan suuruisia lukuarvoja, muunnetaan häikäisy häikäisyindeksiksi (BGI) yhtälön 4 mukaisesti.

$$\text{BGI}_{\text{Hopkinson}} = 10 \log_{10} G_{\text{total}} \quad (4)$$

jossa $\text{BGI}_{\text{Hopkinson}}$ = Hopkinsonin häikäisyindeksi
 G_{total} = häikäisyluku.

Tätä yhtälöä käyttäen voidaan laskea häikäisyindeksit suoraan missä tahansa tilanteessa tai sitä voidaan käyttää taulukoiden laatimiseen valaisimille, joiden korjaamattomat häikäisyindeksit (Uncorrected Glare Index; UGI) halutaan esittää (taulukko 2). UGI-arvot on määritetty standardiolosuhteissa ja ne muunnetaan todellista tilannetta vastaaviksi BGI-arvoiksi korjauskertoimien avulla /6/.

Standardiolosuhteet ovat:

- 1) Valaisinten välimatka on sama kuin valaisinten korkeus silmän tasolta (H).
- 2) Katsoja on keskellä takaseinää ja katsoo suoraan vastakkaiseen seinään.
- 3) Silmän korkeus lattiasta on 1,2 m ja valaisinten korkeus silmästä on 2 m.
- 4) Huoneen ulottuvuudet X ja Y voidaan ilmaista korkeuden H monikertoina.
- 5) Valaisinten valovirta on 1000 lm.

Jotta olisi voitu löytää sopivat rajat BGI-arvoille erilaisissa tilanteissa /7/, IES kokoosi ryhmän koehenkilöitä, jonka avulla tutkittiin suuri määrä tyypilliseksi katsottuja valaistusasennuksia /8/. Koehenkilöitä pyydettiin kertomaan, tuntuiko kunkin tilanteen häikäisy hyväksyttävältä siihen liittyvään työtehtävään. Saadut arviot suhteutettiin kussakin tilanteessa laskettuihin BGI-arvoihin. Tämän perusteella määriteltiin häikäisyindeksille raja-arvot erilaisille tilanteille. Taulukossa 3 olevat esimerkit ovat peräisin viimeisimmästä CIBSen sisävalaistusohjeistosta /9/.

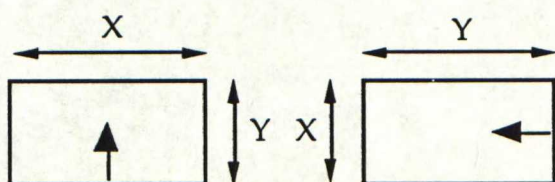
Menetelmä on käytössä Iso-Britanniassa, Belgiassa, Etelä-Afrikassa sekä muokatussa muodossa Pohjoismaissa (NB-menetelmä) /10/. BGI:n suositusarvot vaihtelevat välillä 13 – 28, joista pienimmät arvot koskevat erittäin suurta tarkkuutta vaativia työtehtäviä, kuten kellosepäntyötä ja näyttöpäätetyötä ja suurimmat arvot raskasta teollisuutta, kuten valimoita ja rauta- ja terässulattoja.

Toimistotyössä häikäisyindeksin kolmen yksikön muutos on merkittävä, mutta pienempiikin muutos voi olla havaittava, jos alkuperäinen häikäisyindeksi on lähellä työtehtävään määritettyä raja-arvoa.

Taulukko 2. Hopkinsonin häikäisyindeksijärjestelmän mukainen valaisimen standardiolosuhteissa määritetty UGI-arvotaulukko (laskettu CIBSE TM10, 1985 mukaan [6]).

Korjaamattomat häikäisyindeksit (UGI)										
Katon heijastussuhde	0,70	0,70	0,50	0,50	0,30	0,70	0,70	0,50	0,50	0,30
Seinien heijastussuhde	0,50	0,30	0,50	0,30	0,30	0,50	0,30	0,50	0,30	0,30
Työtason heijastussuhde	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Huoneen dimensiot		Poikittainen katsesuunta					Pitkittäinen katsesuunta				
X	Y										
2H	2H	4,8	6,1	5,8	7,2	8,6	1,9	3,2	3,0	4,4	5,8
3H		8,4	9,6	9,5	10,8	12,2	4,3	5,5	5,4	6,6	8,1
4H		10,2	11,4	11,3	12,5	14,0	5,3	6,4	6,4	7,6	9,0
6H		12,0	13,1	13,1	14,2	15,7	6,1	7,1	7,2	8,3	9,7
8H		12,7	13,8	13,8	14,9	16,4	6,3	7,3	7,4	8,5	9,9
12H		13,4	14,4	14,5	15,6	17,1	6,4	7,4	7,5	8,6	10,1
4H	2H	5,6	6,8	6,7	7,9	9,4	3,7	4,8	4,8	6,0	7,4
3H		9,7	10,7	10,8	11,8	13,3	6,3	7,3	7,4	8,5	10,0
4H		11,8	12,7	12,9	13,9	15,4	7,6	8,5	8,7	9,7	11,2
6H		13,7	14,6	14,9	15,7	17,3	8,6	9,4	9,7	10,6	12,1
8H		14,6	15,4	15,8	16,6	18,1	8,9	9,7	10,1	10,9	12,4
12H		15,5	16,2	16,7	17,4	18,9	9,2	9,9	10,3	11,1	12,6
8H	4H	12,4	13,2	13,6	14,4	15,9	9,4	10,1	10,5	11,3	12,8
6H		14,7	15,4	15,9	16,6	18,1	10,6	11,3	11,8	12,5	14,0
8H		16,0	16,6	17,1	17,8	19,3	11,2	11,8	12,3	13,0	14,5
12H		17,0	17,6	18,2	18,8	20,3	11,5	12,0	12,7	13,2	14,8
12H	4H	12,5	13,2	13,7	14,4	15,9	10,0	10,8	11,2	12,0	13,5
6H		15,0	15,6	16,2	16,8	18,4	11,5	12,1	12,7	13,3	14,9
8H		16,3	16,8	17,5	18,0	19,6	12,1	12,7	13,3	13,9	15,4



H = valaisimen korkeus silmän tasolta
X = huoneen leveys katsesuuntaa vastaan
Y = huoneen pituus katsesuunnassa

Taulukko 3. Esimerkkejä häikäisyindeksisuosituksista [9/].

Tila/työtehtävä	Valaistusvoimakkuus E [lx]	Suosittelun BGI:n yläraja
Piirtäminen, näyttöpäätetyö	750	16
Toimistot, valvontatilat	500	19
Tarkka teollisuustyö	500	22
Karkea teollisuustyö	300	25

1.1.3 Keskieurooppalainen järjestelmä

J. B. de Boer epäili, etteivät edellä kuvatut summamenetelmät olisi olleet sopusoinnussa monimutkaisempien prosessien kanssa, jotka määrittivät useampien häikäisylähteiden vaikutuksen katsojaan. Hän ehdotti itse seuraavaa summayhtälöä häikäisyluvulle [11/:

$$G_{\text{deBoer}} = \sum \frac{L_s \cdot \omega^{0,5}}{L_b^{0,6} \cdot p} \quad (5)$$

jossa $G_{\text{de Boer}}$ = de Boerin häikäisyluku

L_s = häikäisylähteen luminanssi [cd/m²]

L_b = taustan luminanssi [cd/m²]

ω = häikäisylähteen avaruuskulma [sr]

p = sijaintikerroin.

Tämä voidaan muuntaa häikäisyindeksiksi:

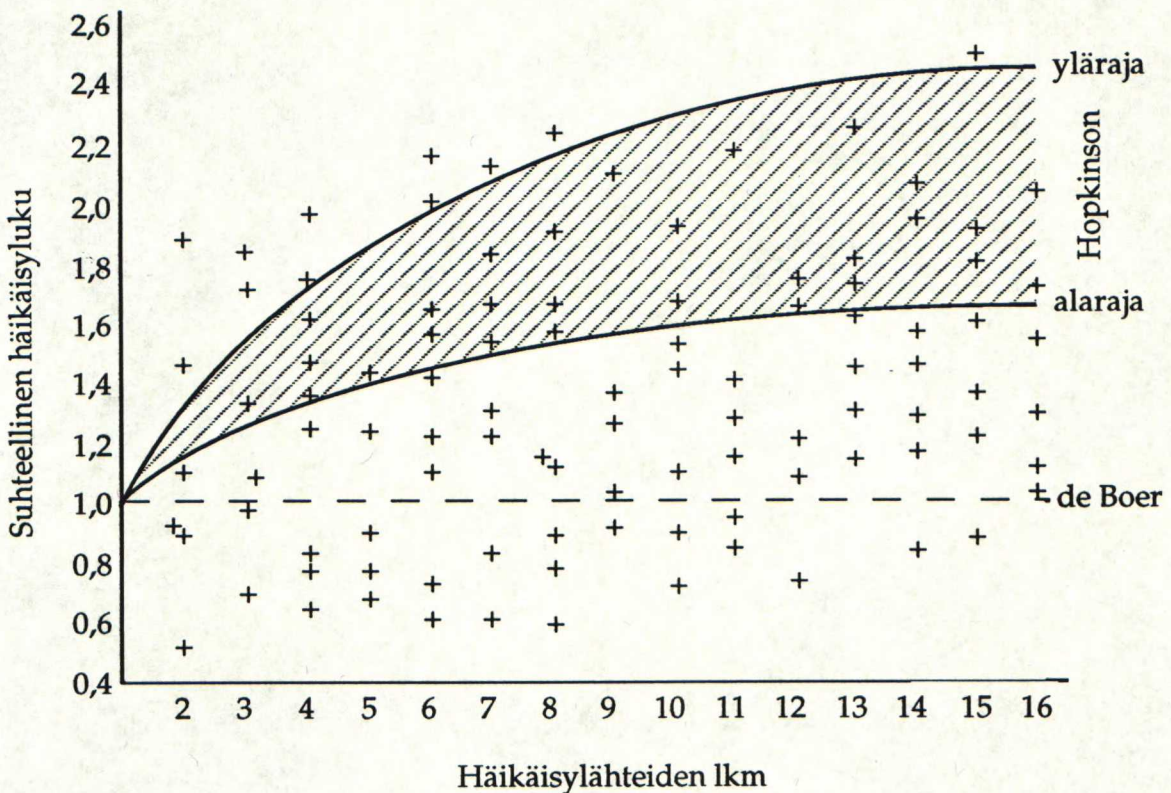
$$GI_{\text{de Boer}} = 10 \log_{10} G_{\text{de Boer}} \quad (6)$$

jossa $GI_{\text{de Boer}}$ = de Boerin häikäisyindeksi

$G_{\text{de Boer}}$ = de Boerin häikäisyluku.

Arndt, Bodmann ja Muck /12/ tutkivat Hopkinsonin ja de Boerin esittämiä summa-menetelmiä kokeellisesti niin, että koehenkilöt altistettiin eri määrille häikäisylähteitä. He huomasivat, ettei kumpikaan menetelmä vastannut hyväksyttävissä rajoissa tutkimustuloksia (kuva 1).

Tämän tutkimuksen takia de Boer vakuuttui siitä, että ratkaisemattoman yksittäisten häikäisylähteiden vaikutusten lisäämisen ongelman kiertämiseksi piti kehittää luotettava menetelmä, joka perustuisi valaistusasennusten subjektiiviseen arvosteluun kokonaisuutena. Tällaisia tutkimuksia on tehnyt mm. Söllner /13/, jonka tavoitteena oli saada aikaan kokemusperäinen häikäisynarvostelujärjestelmä.



Kuva 1. Summayhtälöiden (yhtälöt 3 ja 5) käyttökelpoisuuden vertailu arvioimalla 2 – 16 häikäisylähteen yhteisvaikutusta. Kuvassa de Boerin yhtälöä (yhtälö 5) vastaa katkoviiva ja Hopkinsonin yhtälöä (yhtälö 3) vastaa viivoitettu alue. + = koehenkilöiden vastausten perusteella saadut tulokset [12].

Söllnerin peruskokeet tehtiin toimistohuoneiden 1/3-pienoismaaleissa, joissa todellisia tilanteita oli helppo simuloida. Kokeissa tutkittiin 750 erilaista häikäisytilannetta erikokoisissa huoneissa, eri valaisimen asennoilla (pitkittäin ja poikittain katsojaan nähden), eri valaisimilla, eritehoisilla lampuilla ja erilaisilla valaistusvoimak-

kuuksilla. Tutkimuksissa oli mukana 36 koehenkilöä, jotka tekivät noin 9 200 arviointia 6 pisteen asteikolla, jonka kohdat olivat:

- 0 – ei häikäisyä
- 1 – häikäisy olemattoman ja havaittavan välillä
- 2 – häikäisy havaittavaa
- 3 – häikäisy havaittavan ja epämiellyttävän välillä
- 4 – häikäisy epämiellyttävää
- 5 – häikäisy epämiellyttävän ja sietämättömän välillä
- 6 – häikäisy sietämätöntä.

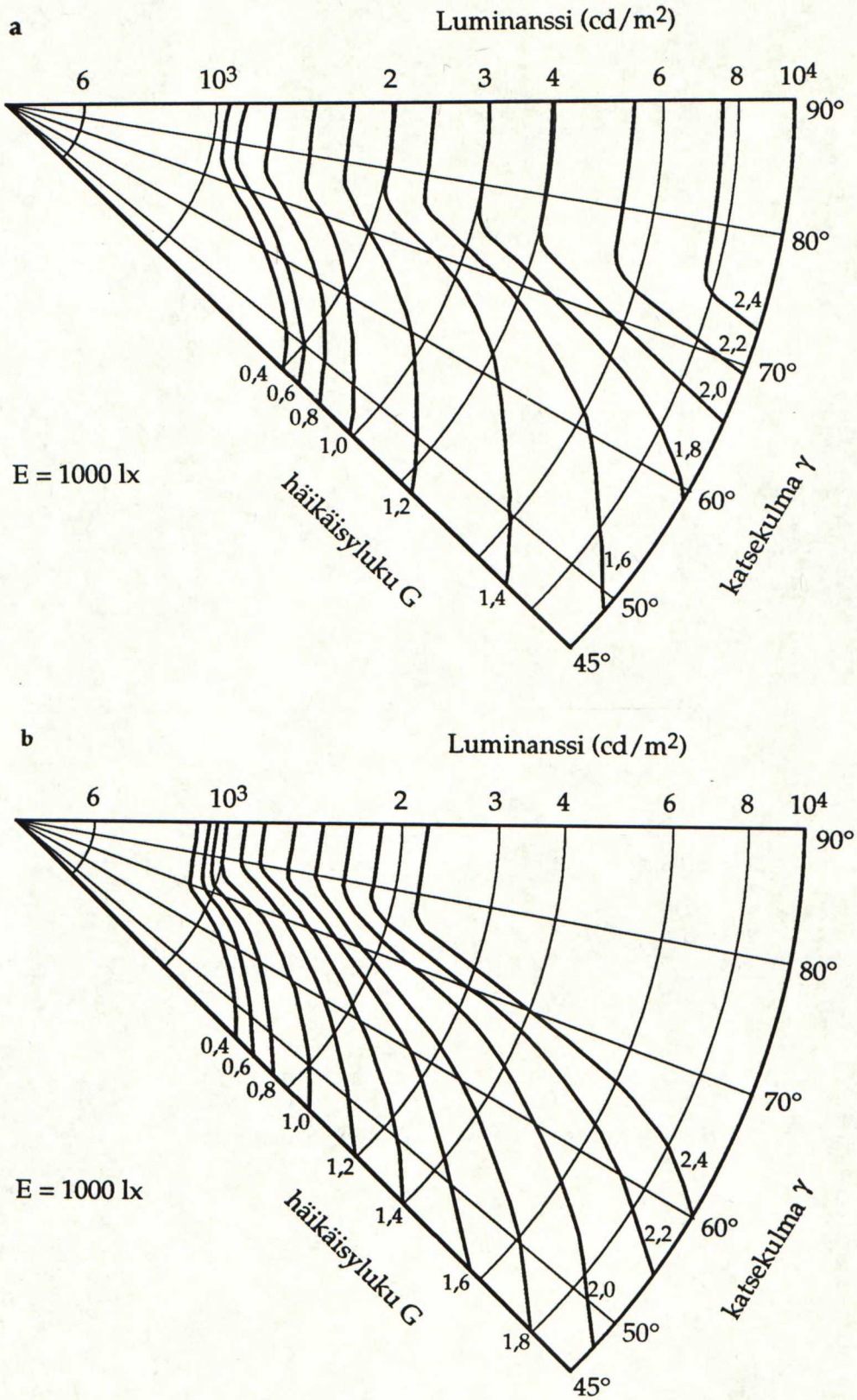
Haubner on osoittanut /14/, että nämä arvioinnit sijoittuvat lähes yhtäläisten välimatkojen päähän toisistaan, eli esimerkiksi asteikon kohta 3 on yhtä paljon miellyttävämpi kohtaa 4 kuin kohta 5 on miellyttävämpi kohtaa 6. Täten sanallisen skaalan muuntaminen lukuarvoiksi tuntuu riittävän hyvin perustellulta.

Haubnerin tulosten analyysi on osoittanut, että käytännössä vain neljällä tekijällä on merkittävä vaikutus koettavaan häikäisyn tunteeseen:

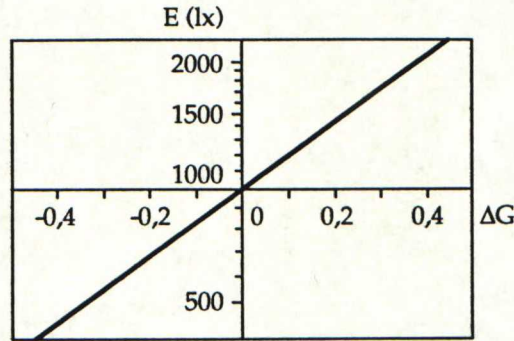
- valaisimen luminanssi
- huoneen pituus ja valaisimen asennuskorkeus (kulma γ)
- katsojan sopeutumistaso, jota voidaan kuvata keskimääräisellä horisontaalivalaistusvoimakkuudella
- valaisimen tyyppi, esim. valon suuntaavuus.

Havaintojen tulokset määrätyle valaistusvoimakkuudelle ja samanlaisten kattoon upotettujen valaisinten määrälle ja niiden symmetriselle sijoittelulle voidaan esittää käyrästä, jossa valaisimen luminanssi esitetään katsekulman (γ) funktiona eri valaistusvoimakkuuksilla ja häikäisytaasoilla, kun työtason valaistusvoimakkuus on 1000 luksia (kuva 2).

Valaistusvoimakkuuden kasvattaminen valaisinten määrää lisäämällä nosti häikäisyn astetta (kuva 3). Tämä ilmiö, jota kutsutaan kovarianssiksi, vahvistettiin Boycen, Crispin ja Simonsin tutkimuksissa /15/, jotka tehtiin erilaisilla valaistus-asennuksilla ikkunattomissa huoneissa. Kuvan 3 avulla voidaan määrittää häikäisyn aste (G), kun valaistusvoimakkuus työtasolla ei olekaan 1000 luksia. Tällöin kuvasta 2 saatuun häikäisylukuun summataan häikäisyluvun muutos (ΔG), joka saadaan kuvasta 3 työtason valaistusvoimakkuuden (E) perusteella.

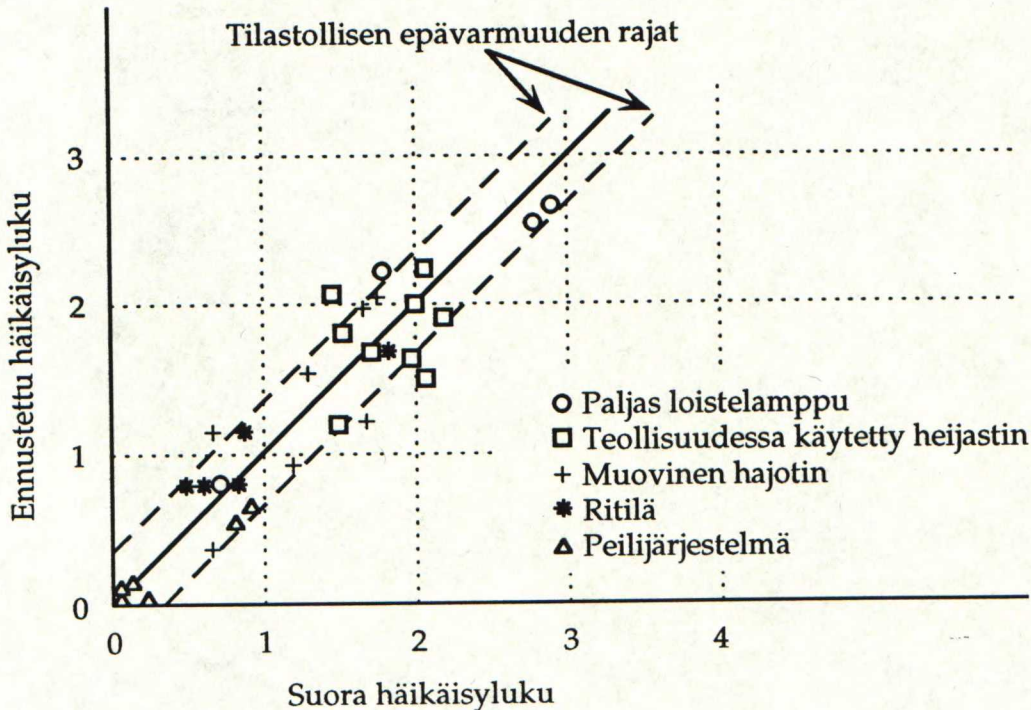


Kuva 2. Valaisimen luminanssin L raja-arvot katsekulman (γ) funktiona. Parametrina on häikäisyluku (G) työtason valaistusvoimakkuudella 1000 lx ja standardiolosuhteissa [6], kun valaisinta katsotaan a) pituusakselin suuntaisesti, b) kohtisuoraan pituusakselia vasten.



Kuva 3. Diagrammi, jonka avulla voidaan määrittää häikäisyluvun muutos (ΔG) valaistusvoimakkuudesta (E).

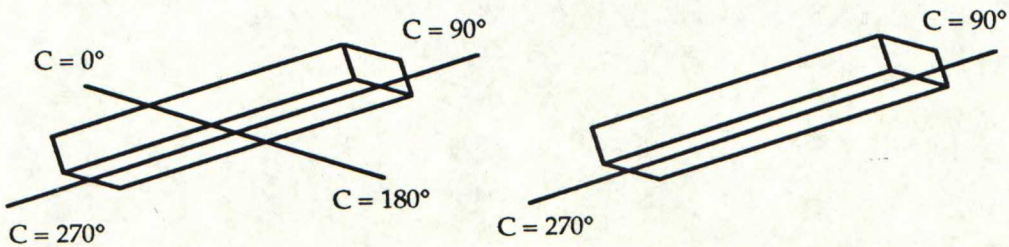
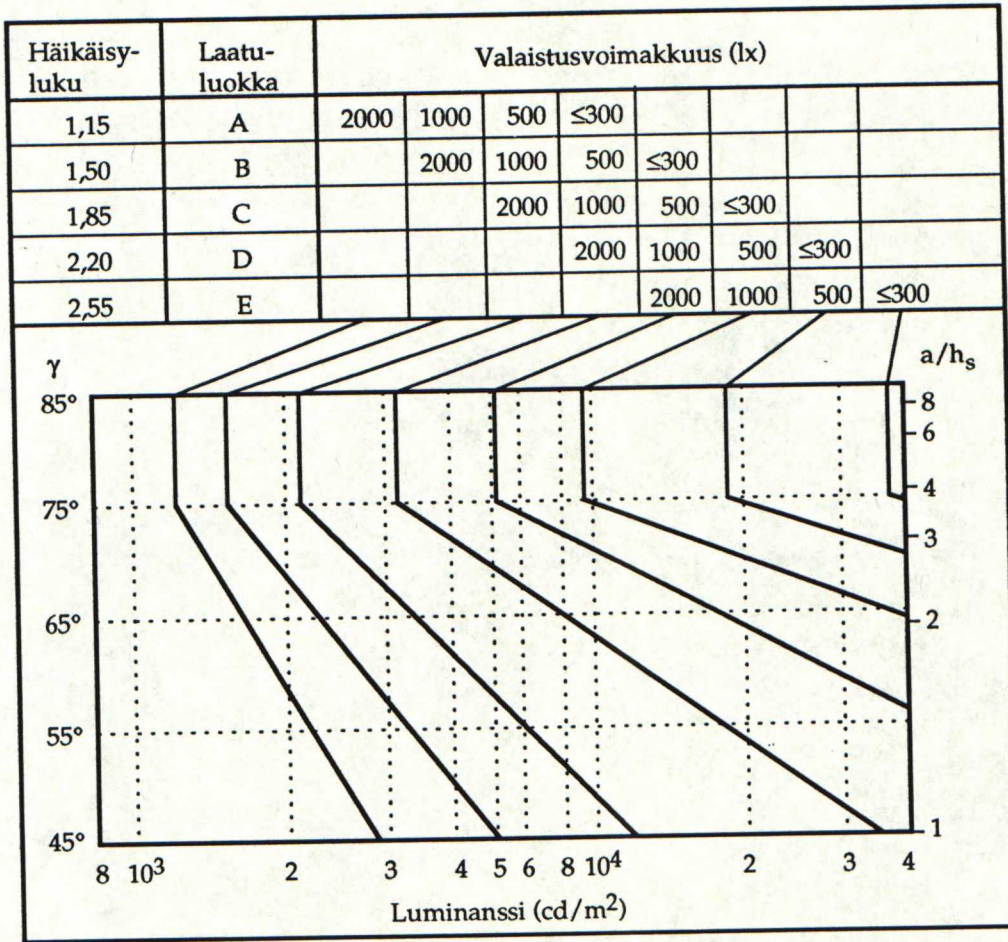
Bodmann, Söllner ja Senger rakensivat useita Söllnerin tutkimia häikäisytilanteita uudelleen täysikokoiseen huoneeseen Karlsruhen yliopiston Valaistusinstituutissa /13/. Häikäisyä arvioitiin samoin kuin Söllnerin tutkimuksissa aikaisemmin ja uudet tutkimukset vahvistivat aikaisempia. Karlsruhessa on tehty myös kokeita todellisissa sisätila-asennuksissa. Tätä tarkoitusta varten koehenkilöryhmät joutuivat arvioimaan hyvin erilaisia tiloja tavallisista pienistä toimistohuoneista suuriin tehdashalleihin. Näistä subjektiivisista arvioinneista saadut tulokset on esitetty kuvassa 4 suorina häikäisylukuina ja niitä verrataan Söllnerin järjestelmän mukaisesti ennustettuihin häikäisylukuihin.



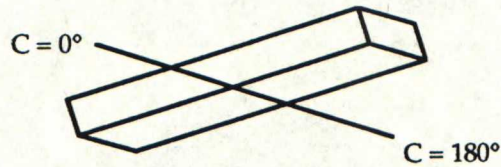
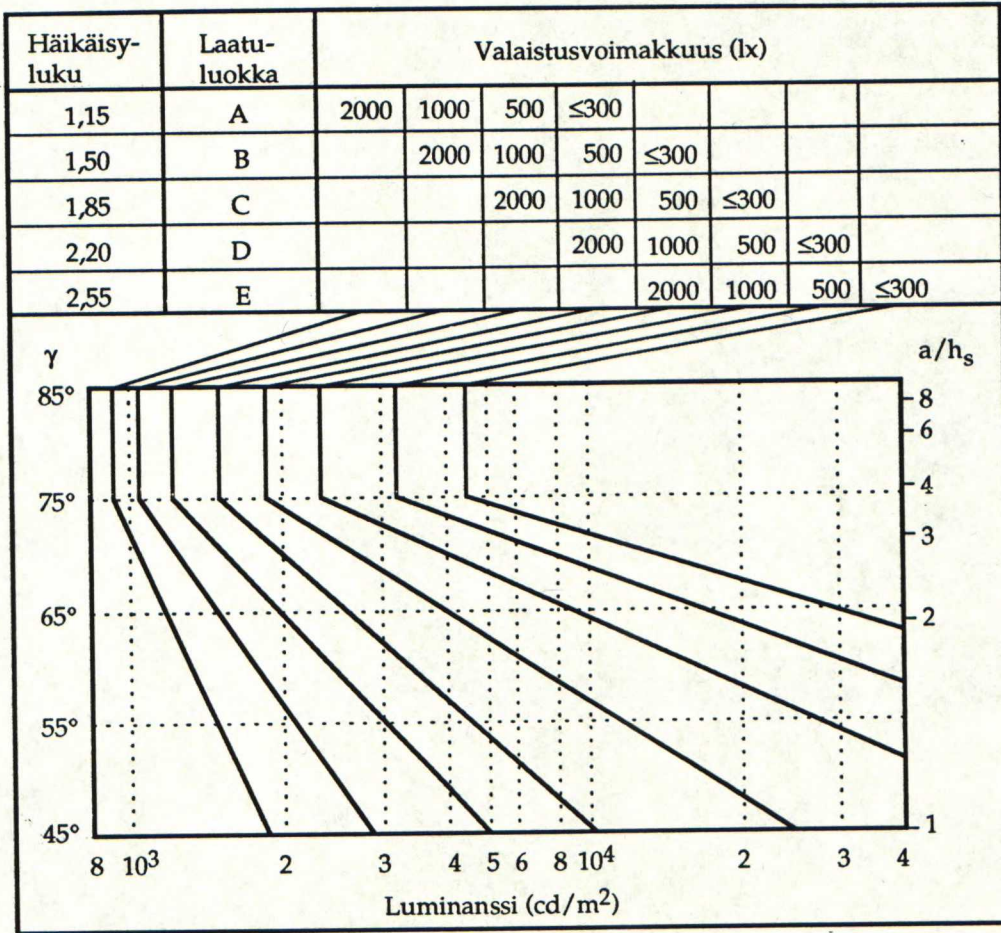
Kuva 4. Suoran ja ennustetun häikäisyluvun vertailua todellisissa sisäasennuksissa.

Mitä lähempänä mittaustulos on kuvassa olevaa yhtenäistä suoraa, sitä paremmin se vastaa yhtälön 5 mukaisesti laskettua häikäisylukua. Parhaiten häikäisylukuja vastasivat valaisimet, joissa oli tavallinen ritilä tai peiliheijastin. Eniten hajontaa oli teollisuudessa käytetyillä heijastimilla ja valaisimilla, joissa oli muovinen hajotin.

Fischer /16/ arvioi Söllnerin järjestelmää matemaattisesti ja standardoidusti jaotelluilla häikäisy- ja valaistusvoimakkuusasteikoilla. Näin hän muutti luminanssikäyrämenetelmän häikäisynarvostelujärjestelmästä melko yksinkertaiseksi häikäisyn rajoitusmenetelmäksi. Menetelmä määrittelee luminanssin rajoittavat jakaumat eri laatuluokissa (taulukko 4) kulman γ funktiona alueella $45^\circ - 85^\circ$. Kuvissa 5a ja 5b on esitetty CIE:n julkaisemat eri häikäisylukuja vastaavat luminanssirajakäyrät /17/.



Kuva 5a. Luminanssikäyrämenetelmän luminanssikäyrät, joita käytetään valaisimille, joissa ei ole valaisevia ulkosivuja ja sellaisille valaisimille, jotka ovat pitkänomaisia ja joissa on valaisevat ulkosivut katsottaessa valaisinta pitkittäissuunnassa. γ ja a/h_s kuvasta 6.

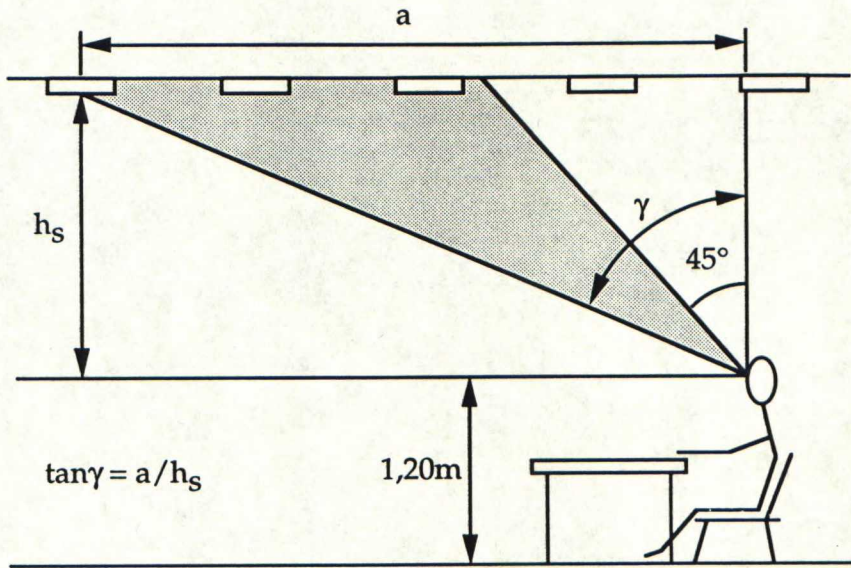


Kuva 5b. Luminanssikäyrämenetelmän luminanssikäyrät, joita käytetään kaikille valaisimille, joissa on valaisevat ulkosivut, paitsi sellaisille valaisimille, jotka ovat pitkänomaisia ja joissa on valaisevat ulkosivut katsottaessa valaisinta pitkittäissuunnassa. γ ja a/h_s kuvassa 6.

Luminanssikäyrämenetelmä perustuu seuraaviin olettamuksiin:

- heijastussuhteet: katto 0,7 – 0,8, seinät 0,4 – 0,6, lattia 0,1 – 0,3
- katsesuunta vaakasuora ja seinien suuntainen
- katsojan sijainti takaseinän keskellä
- valaisimet säännöllisessä muodostelmassa, sivut seinien suuntaiset.

Koska tilat ja niissä tehtävät työt ovat erilaisia, on myös häikäisyn rajoittamisen tarve niissä erilaista. Tämän vuoksi luminanssikäyrämenetelmään on liitetty viisi eri laatuluokkaa, jotka on esitetty taulukossa 4.



Kuva 6. Alue, jolla luminanssirajoja tarkkaillaan (tummennettu). a = katsojan vaakasuora etäisyys häikäisylähteen keskipisteestä, h_s = valaisimen korkeus vaakasuorasta katsetasosta, γ = katsekulma valaisimen keskipisteeseen.

Työtehtävien jakaminen laatuluokkiin on esitetty tarkemmin kunkin luminanssi-käyrämenetelmää käyttävän maan omissa standardeissa /18/. Järjestelmä on käytössä nykyisin Hollannissa, Israelissa, Italiassa, Itävallassa, Japanissa, Ranskassa, Saksassa ja Sveitsissä.

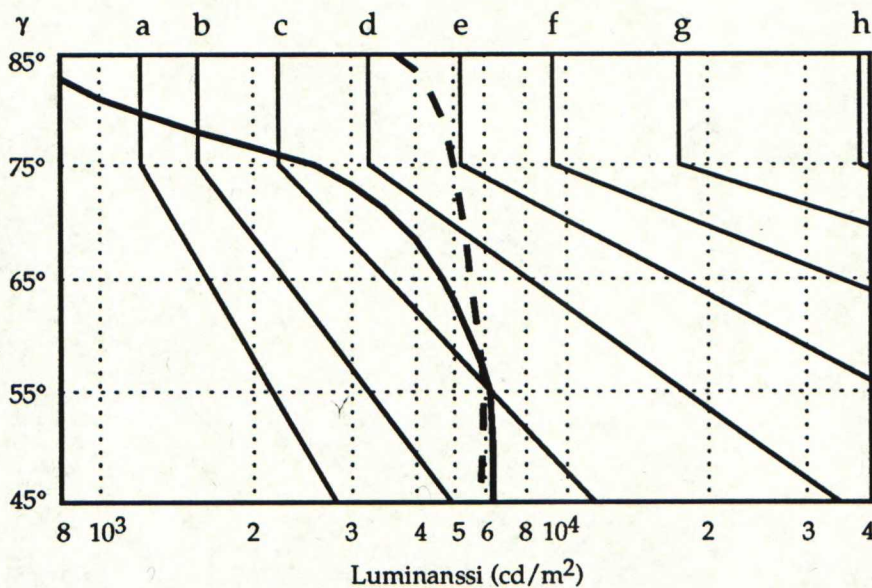
Karkea nyrkkisääntö siirtymisessä eri laatuluokkien välillä on se, että kun valaistusvoimakkuus pysyy vakiona, valaisimen luminanssirajakäyräksi tulee seuraava ylempi käyrä, kun siirrytään yhtä laatuluokkaa alemmaksi (esim. B:stä C:hen). Tällöin 45 asteen katsekulmassa rajaluminanssi saa noin kaksinkertaistua. Vastaavasti jos luminanssiraja pidetään vakiona, valaistusvoimakkuus kaksinkertaistuu alempaan laatuluokkaan siirryttäessä.

Tavallisesti valaisimen luminanssi annettuun suuntaan lasketaan valovoiman ja kyseiseen suuntaan valaisevan projektiopinnan osamääränä. Menetelmän toimivuuden takaamiseksi valaisinvalmistajien olisi julkaistava valaisinten luminanssijakaumat valaisinluetteloissa kuvassa 7 esitetyn mallin mukaisesti.

Taulukko 4. Vaadittavan häikäisynrajoituksen laatuluokat [18/].

Laatuluokka	Häikäisyluku	Työtehtävä
A	1,15	Erittäin suurta tarkkuutta vaativa
B	1,50	Melko suurta tarkkuutta vaativa
C	1,85	Normaalitarkkuutta vaativa
D	2,20	Ei vaadi kovin suurta tarkkuutta
E	2,55	Ei vaadi tarkkuutta

Jos valaisimen luminanssi ei ylitä missään kriittisessä kohdassa tietyn laatuluokan luminanssirajakäyrää, kyseisen valaisimen katsotaan täyttävän tämän laatuluokan häikäisynrajoitusehdot.



Kuva 7. Erään loistelamppuvalaisimen luminanssijakauma pituussuunnassa (katkoviiva) ja leveyssuunnassa (yhtenäinen viiva). Valaisimessa ei ole valaisevia ulkolaitoja. a – h = kuvien 5a ja 5b valaistusvoimakkuuksia vastaavat käyrät.

1.1.4 Häikäisynarvostelujärjestelmien vertailua

Kaikki edellä esitellyt menetelmät perustuvat samohin suureisiin häikäisyn arvioimissa, eli häikäisylähteen luminanssi, taustan luminanssi, häikäisylähteen sijainti ja häikäisylähteen koko (avaruuskulma).

Näitä menetelmiä, eli amerikkalaista VCP-menetelmää, englantilaista BGI-menetelmää ja luminanssikäyrämenetelmää, käytetään nykyisin eri puolilla maailmaa. VCP-menetelmä on käytössä pääasiassa Pohjois-Amerikassa, BGI-menetelmä Iso-Britanniassa, Belgiassa, Etelä-Afrikassa ja edelleen muokatussa muodossa (NB-menetelmä) Suomessa ja muissa Pohjoismaissa. Luminanssikäyrämenetelmää käytetään pääasiassa Keski-Euroopan maissa sekä Japanissa ja Israelissa.

Kuten Manabe /19/ on osoittanut, näiden menetelmien antamat arviot häikäisyn tunteesta ovat melko hyvin sopusoinnussa keskenään. Menetelmien antamat häikäisyarvot poikkeavat kuitenkin toisistaan siten, että VCP-menetelmä antaa prosenttilukuja välillä 0 – 100, BGI-menetelmä häikäisyindeksi-arvoja välillä 13 – 28 ja luminanssikäyrämenetelmässä katsotaan raja-arvot käyrästöstä, johon merkitään valaisinten valonjaot. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että mikä tahansa näistä järjestelmistä mahdollistaa sen, että valaistussuunnittelija pystyy laskemaan suunnittelemansa asennuksen tuottaman kiusahäikäisyn määrän.

Taulukossa 5 on esitetty Fischerin laskemien asennusten, joissa valaistusvoimakkuus on 500 – 1000 luksia ja valaisinten tuottama valo on tasahajoittunutta ja valaisevat alueet ovat pelkästään vaakasuuntaisia, antamien häikäisyarvioiden vertailua eri järjestelmillä /20/.

Taulukko 5. Eri häikäisynarvostelujärjestelmien vertailua eräässä asennuksessa /20/.

Tilastollinen näkömukavuus	VCP (%)	75	65	55	45	–
Häikäisyindeksi	BGI	19	20,5	22	23,5	25
Luminanssikäyrämenetelmä	Laatuluokka	A	B	C	D	E

Tilastollinen näkömukavuus voidaan määrittää laskennallisesti, kun tunnetaan häikäisylähteen luminanssi, koko ja sijainti näkökentässä sekä koko näkökentän keskimääräinen luminanssi. Laskenta on kuitenkin niin hankalaa ja monimutkaista, että se on suositeltavaa suorittaa tietokoneella. Saadut VCP-arvot ovat helposti ymmärrettäviä, sillä ne kertovat suoraan valaistukseen tyytyväisten osuuden tai vaihtoehtoisesti todennäköisyyden, jolla satunnaisesti valittu henkilö pitää valaistusta tyydyttävänä. Tietokoneen avulla voidaan helposti tutkia parametrien muutosten vaikutusta VCP:hen.

Häikäisyindeksimenetelmä on varsin perusteellinen häikäisynarvostelumenetelmä, joka mahdollistaa häikäisyn numeerisen laskennan, kun tunnetaan huoneen mitat, heijastussuhteet ja valaisinten sijainnit. Häikäisyä voidaan vertailla erilaisissa tilanteissa muuttamalla yhden tai useamman parametrin arvoja.

Luminanssikäyrämenetelmä on puolestaan yksinkertainen häikäisynesto- tai valaisinten valintajärjestelmä. Sitä on helppo käyttää häikäisynarviointijärjestelmiä tuntemattomankin henkilön, kuten sisustussuunnittelijan tai rakennusurakoitsijan. Järjestelmä sallii valaisinten yksinkertaisen luokittelun ominaisuuksien mukaan. Se toimii hyvin aina, kun huoneen heijastussuhteita ei tunneta. Lisäksi valaistusasennusten tarkastaminen onnistuu käytännön tilanteissa helposti käyttämällä pelkästään yksinkertaisia mittalaitteita.

1.2 CIE:n työ vuoden 1971 jälkeen

Nykyisin CIE tutkii kiusahäikäisyä kolmessa työryhmässä, jotka ovat:

- TC 1-25 Fundamentals of Discomfort Glare
- TC 3-01 Discomfort Glare from Small and Large Sources
- TC 3-13 CIE Discomfort Glare Evaluation System

Lisäksi häikäisyn vaikutusta tutkitaan useissa työryhmissä, joissa käsitellään päivänvalon vaikutusta näkemiseen.

Vuonna 1971 CIE:n työryhmä "Discomfort Glare" siirrettiin Australiaan ja sille annettiin uudeksi tehtäväksi tutkia olemassaolevia järjestelmiä ja yhdistää niiden parhaat ominaisuudet yhdeksi yleisesti hyväksytyksi järjestelmäksi. Lisäksi päätettiin kehittää tietokoneiden avulla hyödynnettävissä oleva häikäisy-yhtälö, jossa otettaisiin huomioon kaikki tiedossa olevat häikäisyyn liittyvät asiat.

Tällaisen yhtälön kehitti H. D. Einhorn /21/ ja se sai nimen CGI (CIE Glare Index; CIE:n häikäisyindeksi). Komitea pääsi yksimielisyyteen siitä, että yhtälö oli siihen saakka paras matemaattinen kompromissi eri kansallisten järjestelmien välillä.

$$\text{CGI} = 8 \cdot \lg \left(2 \cdot \frac{1 + E_d/500}{E_d + E_i} \sum \frac{L_s^2 \cdot \omega}{p^2} \right) \quad (7)$$

jossa CGI = CIE:n häikäisyindeksi

E_d = häikäisylähteiden aiheuttama (eli suora) valaistusvoimakkuus silmän kohdalla pystysuoralla tasolla [lx]

E_i = huonepintojen aiheuttama (eli epäsuora) valaistusvoimakkuus silmässä [lx]

L_s = häikäisylähteen luminanssi [cd/m^2]

ω = häikäisylähteen avaruuskulma [sr]

p = häikäisylähteen sijaintikerroin.

Termi $E_d + E_i$ ottaa huomioon sekä häikäisylähteiden että taustaluminanssin vaikutuksen ja vastaa näkökentän keskimääräistä luminanssia (ks. yhtälö 12, s. 33). E_d voidaan erikseen määrittää, jos asetetaan huoneen heijastussuhteet nolliksi ja mitataan sitten valaistusvoimakkuus pystytasolla. $E_d + E_i$ saadaan suoraan valaistusvoimakkuusmittarilla silmän kohdalta, kun heijastussuhteet ovat normaalit.

Hyvistä ominaisuuksistaan huolimatta yhtälö on melko epäkäytännöllinen häikäisyarvostelujärjestelmän perustaksi. Osoittaja $(1 + E_d/500)$ varmistaa sen, että aina on olemassa hieman kovarianssia kiusahäikäisyn ja yleisen valaistustason välillä, eli kun valaistusvoimakkuus kasvaa, häikäisyindeksikin kasvaa, kuten Söllner on koeksissaan osoittanut. Tämä aiheuttaa kuitenkin sen, ettei CGI ole riippuvainen pelkästään huoneen heijastussuhteista ja mitoista, kuten Hopkinsonin yhtälöön (3) perustuvassa häikäisyindeksimenetelmässä, vaan myös valaistustasosta. Tämän vuoksi yksi valaisimen UGI-taulukko ei riitä, kuten häikäisyindeksimenetelmässä.

Toisaalta Hopkinsonin yhtälössä on perustavaa laatua oleva matemaattinen heikkous. Avaruuskulman ω eksponentin 0,8 takia laajojen häikäisylähteiden jakaminen pienempiin osiin ja yhteenlaskeminen tuottaa eri tuloksen kuin koko häikäisylähteen pitäisi tuottaa. Esimerkiksi jos käsitellään valaistusasennusta, jossa on kaksinkertainen määrä puolta pienempiä (laajoja) valaisimia kuin vertailukohteessa, häikäisyindeksi kasvaa noin 0,6 yksiköllä. Tämän vuoksi häikäisyindeksimenetelmällä on mahdotonta käsitellä lineaarisesti sijoitettujen valaisinryhmien ja laajojen valaisinten aiheuttamaa kiusahäikäisyyä ilman lisäoletusten tekemistä.

Luminanssikäyrämenetelmää ei pidetty ajanmukaisena Söllnerin tutkimusten jälkeen, joissa käytettiin 1960-luvun valaisimia. Menetelmä ei toiminut kunnolla mo-

dernien valaisinten kanssa, joissa oli heijastavat ritalät. Lisäksi Euroopassa ei pidetty tyydyttävänä sitä tilannetta, että häikäisyindeksimenetelmä ja luminanssikäyrämenetelmä eivät olleet yhteensopivia.

Nämä asiat tuotiin esille CIE:n 21. istunnossa "Discomfort Glare in Interior Lighting" vuonna 1987 Venetsiassa. Siellä päädyttiin ehdotukseen, että CIE:n divisioonat 1 ja 3 aloittaisivat kaksi uutta komiteaa, joista toinen käsittelisi häikäisyn perusominaisuuksien tutkimusta ja toinen yhtenevää häikäisynarvostelujärjestelmää, joka julkaistaisiin seuraavassa CIE:n sisävalaistusoppaassa (CIE Guide on Interior Lighting).

Divisioonaan 3 perustettiin uusi työryhmä TC 3-13 "CIE Discomfort Glare Evaluation System". Siellä päästiin yhteisymmärrykseen siitä, että olisi kehitettävä kompromissi, jossa vältettäisiin Hopkinsonin (3) ja Einhornin (7) yhtälöiden huonot puolet. Sovittiin myös, että tästä yhtälöstä pitäisi johtaa myös yksinkertainen luminanssikäyrämenetelmän kaltainen menetelmä niin, että molemmista menetelmistä tulisi yhteensopivia toistensa kanssa. Uutta yhtälöä ehdotti tanskalainen Sørensen /22/:

$$UGR = 8 \cdot \lg \left(0,25 \sum \frac{L_s^2 \cdot \omega}{L_b \cdot p^2} \right) \quad (8)$$

jossa UGR = Sørensenin häikäisyindeksi (Unified Glare Rating)

L_b = taustan luminanssi [cd/m^2], numeerisesti sama kuin silmän epäsuora valaistusvoimakkuus [lx] jaettuna piillä; E_i/π

L_s = häikäisylähteen luminanssi [cd/m^2]

ω = häikäisylähteen avaruuskulma [sr]

p = sijaintikerroin.

Nyt ω :n eksponentti on ykkönen, mikä mahdollistaa häikäisylähteen osien summaamisen yhteen. Vakion arvo 8 antaa parhaan mahdollisen yhteensopivuuden Hopkinsonin yhtälön kanssa. UGR-arvot poikkeavat yleensä alle yhdellä yksiköllä Hopkinsonin häikäisyindekseistä.

Koska UGR-yhtälö yhdistää Einhornin ja Hopkinsonin yhtälöt ja käyttää lisäksi Guthin sijaintikerrointa, sitä voidaan pitää yhdistelmänä perusyhtälöiden parhaista puolista sekä käytännöllisyytensä että tulostensa vastaavuuden ansiosta. UGR-yhtälön perusteella on kehitetty CIE Unified Glare Rating System (UGR-menetelmä).

1.3 Standardointi Euroopassa

Useilla aloilla Euroopassa ei enää tehdä standardointia kansalliselta pohjalta, vaan sen hoitaa eurooppalainen standardointijärjestö CEN (Comité Européen de Normalisation), jota tukevat Euroopan Unioni ja EFTA. Syyskuussa 1989 CEN perusti teknisen komitean CEN TC 169 "Lighting Applications". Komitean tarkoituksena on valmistella eurooppalaisia valaistusalan standardeja. Tässä komiteassa on 7 työryhmää (WG = working group):

- WG1: General terms and quality criteria
(Yleinen termistö ja laatuvaatimukset)
- WG2: Lighting of work spaces and schools
(Työtilojen ja koulujen valaistus)
- WG3: Emergency lighting
(Turvavalaistus)
- WG4: Sports lighting
(Urheilutilojen valaistus)
- WG5: Street lighting
(Katuvalaistus)
- WG6: Tunnel lighting
(Tunnelivalaistus)
- WG7: Photometric data for luminaires
(Valaisinten fotometriset tiedot).

Ryhmissä WG1 ja WG2 päätettiin käyttää UGR-menetelmää kiusahäikäisyn arvos-
teluun ja rajoittamiseen sisävalaistuksessa. Lisäksi WG2:n kokouksessa kesäkuussa
1991 sovittiin otsikointi taulukkoon, joka määrittelee valaistussuositukset eri sisäti-
loihin ja toimintoihin Euroopan sisävalaistussuosituksessa. Taulukon pääotsikkori-
villä ovat:

- 1) Tila/toiminta
- 2) Valaistusvoimakkuus [lx]
- 3) UGR-raja-arvo
- 4) Värintoistoindeksi (R_a)
- 5) Huomautuksia.

Valaistusvoimakkuuden ja UGR:n raja-arvojen yhdistelmää voidaan käyttää kovarianssin huomioonottamiseksi (kuva 3) kuten on tehty brittiläisessä ohjeistossa /9/ (taulukko 3). Jos valaistusvoimakkuudelle on annettu korkeita suosituksia, vaaditaan matalampia UGR-arvoja ja päinvastoin.

1.4 VCP-menetelmä

Kiusahäikäisy on näkökentässä olevien korkeiden luminanssien aiheuttama epämiellyttävyyden tunne. Koska tälle ei ole olemassa yleisesti hyväksyttyä mitta-asteikkoa, käytetään sen mittana näkökentässä olevien valaisimien (häikäisylähteiden) aiheuttamaa häikäisyä, joka esitetään suureen VCP avulla. Häikäisyä aiheutuu, kun valaisimen luminanssi on riittävän paljon korkeampi kuin sen ympäristön luminanssi. VCP on arvio siitä, millä todennäköisyydellä henkilö pitää valaistusolosuhteita miellyttävinä määritellyissä olosuhteissa. VCP voidaan tulkita myös siten, että se kertoo riittävän suuresta populaatiosta valaistusolosuhteisiin tyytyväisten osuuden. Menetelmän etuna on ymmärrettävien numeroarvojen lisäksi se, ettei mitattavien suureiden arvoille ole asetettu rajoituksia. VCP-menetelmää voidaan täten soveltaa kaikenlaisten valaistusasennusten arviointiin.

VCP:n laskemiseen tarvittavat yhtälöt perustuvat enemmänkin suureen määrään mittaustuloksia kuin näköprosessiin liittyvien mallien käsittelyyn. Simuloiduissa huonetiloissa on tehty kokeita, joiden perusteella on voitu varmistaa laboratoriotulosten laajentaminen todellisiin valaistusolosuhteisiin.

Tutkimuksissa on pääasiallisesti käytetty halkaisijaltaan n. 2 metrin (80 tuumaa) suuruista integroivaa palloa, josta on leikattu pois kolmanneksen suuruinen pala. Koehenkilön pää on asetettu leukatuen avulla paikalleen niin, että hänen silmänsä ovat pallon keskipisteen kohdalla eli 1 metrin (40 tuumaa) päässä pallon sisäpinnasta /2, figure 1/. Lamppu on sijoitettu koehenkilön pään yläpuolelle, jolloin pallon sisäpinnan luminanssi on vakio, noin 35 cd/m^2 (10 fL). Lampun ja koehenkilön väliin on asetettu pieni suojalevy, jotta välttyttäisiin suoralta häikäisyltä ja lämpösäteilyltä. Näkökenttä on kokonaisuudessaan pallon sisällä ja pallon sisäpinnan luminanssi on koko näkökentän taustaluminanssi. Häikäisylähde on sijoitettu johonkin pallon pintaan tehdyistä aukoista ja suodattimien avulla häikäisylähteinä toimivien lamppujen spektrijakauma on saatu pysymään riittävän vakiona, kun niiden luminanssia säädetään nollan ja $100\,000 \text{ cd/m}^2$:n (30 000 fL) välillä.

Luckieshin ja Guthin tutkimukseen /2/ osallistui 50 satunnaisesti valittua koehenkilöä, joiden ikä vaihteli 20 ja 40 vuoden välillä. Jatkotutkimuksia koehenkilöiden kanssa on tehnyt mm. Allphin /25/, jonka 134 koehenkilöstä 109 valittiin lopullisiin tutkimuksiin. Iät vaihtelivat 19 ja 69 vuoden välillä ja noin puolet tutkituista oli iältään 30 ja 40 vuoden välillä. Allphin ei löytänyt korrelaatiota iän ja valaisinten halutun kirkkauden välillä. Täten ei myöskään voitu todistaa, että iän ja häikäisyn välillä olisi ollut korrelaatiota.

Perusyhtälöt määrittävät aistimusindeksin M jokaiselle häikäisylähteelle ja summaavat jokaisen lähteen koko näkökenttään tuottaman kiusahäikäisyn (DGR; Discomfort Glare Rating). DGR-arvot ovat suhteellisen mielivaltaisia lukuarvoja, jotka kasvavat epämiellyttävyyden kasvaessa. DGR-arvo voidaan muuntaa VCP-arvoksi, jolloin saadaan suoraan todennäköisyys valaistusasennuksen miellyttävyydestä:

$$M = \frac{0,50 L_s Q}{p F^{0,44}} \quad (9)$$

$$DGR = \left[\sum_n M \right]^{n^{-0,0914}} \quad (10)$$

joissa M = häikäisylähteen aistimusindeksi

L_s = häikäisylähteen luminanssi [cd/m^2]

Q = häikäisylähteen avaruuskulman funktio, joka on esitetty yhtälössä 11

p = häikäisylähteen sijaintikerroin

F = koko näkökentän (sisältää myös häikäisylähteet) keskimääräinen luminanssi [cd/m^2]

n = häikäisylähteiden lukumäärä näkökentässä

DGR = kiusahäikäisyaste.

Q on tarkastelijan näkemän häikäisylähteen avaruuskulman ω funktio:

$$Q = 20,4 \omega + 1,52 \omega^{0,2} - 0,075 \quad (11)$$

jossa ω = häikäisylähteen avaruuskulma [sr].

Koko näkökentän keskimääräinen luminanssi voidaan laskea yhtälöstä

$$F = \frac{L_w \omega_w + L_f \omega_f + L_c \omega_c + \sum L_s \omega_s}{5} \quad (12)$$

jossa L_c = katon keskimääräinen luminanssi [cd/m^2]
 L_f = lattian keskimääräinen luminanssi [cd/m^2]
 L_w = seinien keskimääräinen luminanssi [cd/m^2]
 ω_c = katon avaruuskulma [sr]
 ω_f = lattian avaruuskulma [sr]
 ω_w = seinien avaruuskulma [sr].

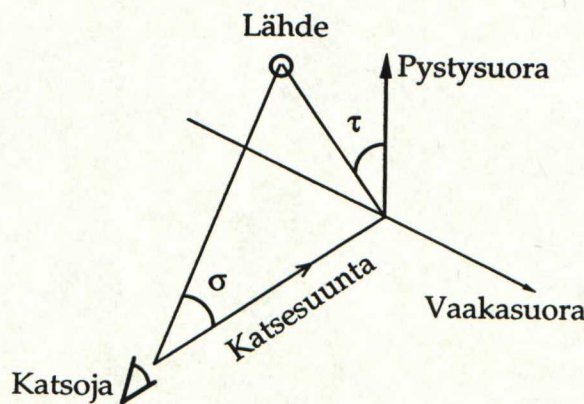
Yhtälön 12 nimittäjässä oleva kerroin 5 johtuu siitä, että ihmisen näkökenttä on suuruudeltaan 5 steradiaania. Näkökentän koko saadaan viitteen 4 taulukosta III, jossa on laskettu lattian, seinien ja katon avaruuskulmat erikokoisissa huonetiloissa.

Sijaintikerroin p ottaa huomioon silmän suhteellisen herkkyyden häikäisylähteen sijainnille. Levin on määrittänyt Luckieshin ja Guthin mittausten /2/ perusteella yhtälön /26/:

$$\ln p = [35,2 - 0,31889\tau - 1,22e^{-2\tau/9}] \cdot 10^{-3}\sigma + [21 + 0,26667\tau - 0,002963\tau^2] \cdot 10^{-5}\sigma^2 \quad (13)$$

jossa σ = katsesuunnan ja tarkastelijan ja häikäisylähteen välisen suunnan kulma [$^\circ$]
 τ = pystysuoran tason ja häikäisylähteen ja katsesuunnan sisältävän tason välinen kulma [$^\circ$].

Sijaintikertoimen määrittävien kulmien σ ja τ geometria on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Sijaintikertoimen määrittävä geometria [23/].

Liitteessä 1 on esitetty sijaintikertoimen arvoja eri kulmien σ ja τ arvoilla.

DGR:n ja VCP:n välinen relaatio voidaan esittää yhtälön 14 /23, 27/ mukaisesti:

$$VCP = \int_{-\infty}^{6,374 - 1,3227 \ln(DGR)} e^{-t^2/2} dt \quad (14)$$

Yhtälö 14 on yleinen tilastotieteessä käytetty yhtälö, joka voidaan hajoittaa kahdeksi polynomiksi /28/:

$$VCP = 100 - 50 \cdot (1 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 + c_4 x^4)^4 \quad DGR < 123,83 \quad (15)$$

$$VCP = 50 \cdot (1 + c_1 |x| + c_2 |x|^2 + c_3 |x|^3 + c_4 |x|^4)^4 \quad DGR \geq 123,83 \quad (16)$$

joissa $x = 6,374 - 1,3227 \cdot \ln(DGR)$

$$c_1 = 0,196854$$

$$c_2 = 0,115194$$

$$c_3 = 0,000344$$

$$c_4 = 0,019527.$$

VCP voidaan määrittää myös graafisesti. Tällöin määritetään DGR yhtälön 10 mukaisesti ja katsotaan saatua DGR:n arvoa vastaava VCP-arvo liitteen 2 kaaviosta.

VCP-arvoja voidaan määrittää myös muille kuin standardiolosuhteille, joiden avulla menetelmä on kehitetty.

1.5 VCP-mittaukset toimistotiloissa

VCP-mittaukset tehtiin kevään 1994 aikana Teknillisen korkeakoulun tiloissa Espoossa ja Näkövammaisten keskusliiton tiloissa Helsingissä. Samalla tehtiin häikäisyyn ja näkemiseen liittyviä mittauksia. Tilat, mittausten menetelmät ja mittalaitteet sekä pohjapiirrokset ja yleiset mittaustulokset on esitetty liitteissä 3 ja 4.

Mittaukset tehtiin pelkässä keinovalossa siten, että huoneiden verhot olivat mahdollisimman hyvin kiinni, eli suoraa auringonvaloa ei päässyt mittaustiloihin. Mittaukset pyrittiin tekemään siten, että tulokset vastaisivat parhaalla mahdollisella ta-

valla työpaikalla työskentelevän työntekijän havaintoja. Mittauspiste oli työntekijän paikalla katsekorkeudella.

Mittaustiloja oli viisi, joista yhdessä mittaukset tehtiin kahdelta eri paikalta. On huomattava, että huoneet I344A ja I343 olivat kalustukseltaan ja kooltaan lähes samanlaiset, tärkeimpänä erona huoneen I343 valaisimista poistetut lamelliritilät. Taulukossa 6 on esitetty lyhyt vertailu tilojen VCP-arvoista. Kuudesta tilanteesta kahdessa VCP:n arvo ei toteuttanut suositusarvoa 70, joskin toisessa näistä tilanteista VCP oli riittävän lähellä (68,0), eli alle 5 prosenttiyksikköä pienempi kuin suositusarvo /4/. Huoneen I343 valaistuksen olisi VCP:n tulkinnan mukaan hyväksynyt alle puolet ihmisistä. Täydelliset mittaustulokset on esitetty liitteessä 6.

Taulukko 6. Mittaustilojen mitatut VCP-arvot. Suositus: VCP \geq 70 /4, 24/. Näkyvien valaisinten lukumäärä = näkökentässä olevien valaisinten lukumäärä, taustaluminanssi = työpisteestä katsesuuntaan mitattu keskimääräinen luminanssi, häikäisyä havainneet = kysymykseen "esiintyykö häikäisyä työtilanteessa" myöntävästi vastanneet.

Tila	Näkyvien valaisinten lukumäärä	Taustaluminanssi [cd/m ²]	Häikäisyä havainneet [%]	VCP [%]
Huone I344A	3	38,0	60,0	93,8
Huone I343	3	51,0	50,0	47,6
Kirjaamo K005	6	66,9	20,0	80,1
Opintotoimisto Y223 suunta 1	6	47,7	100,0	68,0
Opintotoimisto Y223 suunta 3	7	45,6	100,0	81,8
Näkövammaisten keskusliitto	4	29,6	15,0	86,2

Opintotoimistossa kyselyssä oli mukana vain neljä henkilöä, muissa tiloissa 10 – 13 henkilöä, joten tässä suhteessa nämä tilat eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Näkövammaisten keskusliitossa koehenkilöt olivat heikkonäköisiä, eikä heidän tuloksiaan voida verrata normaalinäköisten tuloksiin.

Häikäisyä arvioitiin 4 kohdan asteikolla määritelmillä: ei häikäisyä, häikäisy havaittavaa, häikäisy epämiellyttävää sekä häikäisy sietämätöntä. Arvio häikäisystä on annettu työtilanteessa, johon sisältyi lukeminen, päätetyö ja vaakasuora katsesuunta. Missään tilassa häikäisyä ei arvioitu sietämättömäksi ja ne koehenkilöt, jotka havaitsivat häikäisyä, arvioivat useimmiten häikäisyn havaittavaksi mutta ei epämiellyttäväksi. Selvä poikkeus tästä säännöstä on opintotoimisto, jossa enemmistö työn-

tekijöistä piti häikäisyä epämiellyttävänä molemmissa arviointipisteissä. Huoneessa I343 yksi henkilö piti häikäisyä epämiellyttävänä. Täydelliset tiedot työympäristökyselystä on esitetty viitteessä /29/.

VCP:n soveltuvuus häikäisyn arviointiin

VCP soveltuu häikäisyn arviointiin antamiensa arvojen helpon ymmärrettävyyden ansiosta. VCP kertoo suoraan todennäköisyyden sille, että henkilö on tyytyväinen valaistukseen tai vaihtoehtoisesti valaistukseen tyytyväisten prosenttiosuuden koko populaatiosta. Tulosten tulkinta on siis kohtuullisen yksinkertaista.

VCP:n laskemiseen tarvittavien suureiden mittaaminen on hankalahkoa, koska vielä ei ole kehitetty mittalaitetta, jolla pystyttäisiin keräämään kaikki tiedot yhtä aikaa. Toisaalta tässä asiassa VCP:n mittaaminen ei poikkea muista häikäisynarviointimenetelmistä, sillä kaikissa menetelmissä on mitattava samat asiat.

Mittaustulosten käsittely on helppo hoitaa tietokoneella, kuten muissakin menetelmissä. Jos tietokonetta ei ole käytettävissä, on VCP-menetelmä vaikein monimutkaisimpien algoritmien takia. Jos VCP-arvot määritetään taulukoista ja diagrammeista, työ helpottuu selvästi käsinlaskentaan verrattuna, mutta muiden menetelmien taulukointi on yksinkertaisempaa käyttää.

Saadut mittaustulokset verrattuina muiden menetelmien tuloksiin kertovat, että kaikki menetelmät antavat toisiaan vastaavia tuloksia, mutta toisaalta kiusahäikäisyn subjektiivisuuden takia tuloksia ei voi pitää varmuudella oikeina, kuten taulukko 6 osoittaa. On kuitenkin huomattava, että työympäristökyselyssä tilastollinen otos oli liian pieni (etenkin opintotoimistossa), jotta sen tuloksista voitaisiin tehdä luotettavia päätelmiä, kun taas VCP-menetelmän kehittämisessä on ollut mukana satoja koehenkilöitä.

VCP-menetelmän etu on nimenomaan tulosten havainnollisuudessa, mutta nykyisin käytettävänä olevien tietokoneiden ansiosta se ei muilta ominaisuuksiltaan ole muita menetelmiä monimutkaisempi.

1.6 UGR-menetelmä

1.6.1 UGR-yhtälö ja sen perusominaisuudet

UGR-menetelmä perustuu yhtälöön 8, josta on johdettu kaikki luvuissa 1.6.2, 1.6.3 ja 1.6.4 (ks. kuva 8) esitetyt menetelmät. Yhtälöä voidaan käyttää sellaisenaan esimerkiksi tietokoneella suoritettavassa laskennassa valaistusasennusten suunnittelun tai häikäisyn arvioinnin yhteydessä ja se antaa suoraan käytettynä parhaan mahdollisen arvion kiusahäikäisystä, koska tällöin saadaan suora lukuarvo, eikä tarvita valaisintaulukoita. UGR-taulukot (luvut 1.6.2 ja 1.6.3) ja UGR-käyrät (luku 1.6.4) vastaavat useimmissa tapauksissa yhtälön 8 antamia tuloksia melko hyvin, mutta vaativat toimiakseen standardoituja olosuhteita.

$$\text{UGR} = 8 \cdot \lg \left(0,25 \sum \frac{L_s^2 \cdot \omega}{L_b \cdot p^2} \right) \quad (8)$$

jossa UGR = Sørensenin häikäisyindeksi (Unified Glare Rating)

L_b = taustan luminanssi [cd/m^2], numeerisesti sama kuin silmän epäsuora valaistusvoimakkuus [lx] jaettuna piillä; E_i/π

L_s = häikäisylähteen luminanssi [cd/m^2]

ω = häikäisylähteen avaruuskulma [sr]

p = sijaintikerroin.

Yhtälö antaa UGR:lle arvoja väliltä 10 – 30. Suurempi arvo tarkoittaa suurempaa kiusahäikäisyyä. Normaalissa toimistotyössä raja-arvona pidetään $\text{UGR} \leq 20$. Rajoituksena on, ettei avaruuskulma ω saisi olla pienempi kuin 0,0003 steradiaania. Lisäksi on huomattava, että yhtälön johtamisessa käytetyissä esimerkkitapauksissa häikäisylähteen suurin avaruuskulma oli 0,1 steradiaania, mutta tätä ei ole kuitenkaan asetettu ehdottomaksi ylärajaksi /31/.

Yhtälön 8 perusteella voidaan myös päätellä eri parametrien arvojen muutoksien vaikutukset UGR:n arvoihin /32/.

1.6.1.1 Huoneen vaikutus

Kun huone kuvataan kuten valaisintaulukoissa, parametrejä ovat valaisinten asennuskorkeus työtason suhteen, huoneindeksi ja huonepintojen heijastussuhteet, myös työtason korkeudella olevan tason (jatkossa käytetään nimitystä työtaso) ekvivalentti heijastussuhde. Huoneindeksi lasketaan yhtälöstä

$$k_r = \frac{l \cdot w}{h_m \cdot (1 + w)} \quad (17)$$

jossa k_r = huoneindeksi
 h_m = valaisinten korkeus työtasosta [m]
 l = huoneen pituus [m]
 w = huoneen leveys [m].

Huoneen koko vaikuttaa UGR-arvoon vain vähän tai ei ollenkaan. Jos huoneen koko kasvaa niin, että sen ulottuvuuksien suhteet pysyvät samoina, valaisinten avaruuskulmat pienenevät, mutta samalla myös taustaluminanssi pienenee vastaavasti, joten häikäisyn nettomuutos on nolla.

Huoneindeksillä on monimutkaisempi vaikutus UGR:n arvoihin. Huoneindeksi kertoo sen, kuinka suuri työtason korkeudella olevan tason pinta-ala on suhteessa seinien pinta-aloihin. Suurempi k_r :n arvo tarkoittaa sitä, että taustaluminanssi on suurempi, mikä vaikuttaa pienentävästi UGR:ään. Toisaalta suuri k_r :n arvo tarkoittaa myös sitä, että kauimmat valaisimet ovat lähempänä katsesuuntaa kuin pienillä k_r :n arvoilla, mikä vaikuttaa suurentavasti UGR:n arvoihin. Lopputulos riippuu nyt valaisimien ominaisuuksista ja huonepintojen heijastussuhteista. Yleisesti ottaen UGR kuitenkin kasvaa huoneindeksin kasvaessa.

Koska työtason heijastussuhdetta pidetään yleensä vakiona (0,2), vain seinien ja katon heijastussuhteilla on merkitystä. Näiden vaikutus on vahva, ja suuremmat heijastussuhteet pienentävät UGR:n arvoja merkittävästi. Verrattaessa suuri- ja pieni-heijastussuhteisia huoneita huomataan, että UGR voi olla useita yksiköitä pienempi huoneessa, jonka heijastussuhteet ovat suuria.

1.6.1.2 Valaistusasennuksen vaikutus

Oletetaan, että kaikki huoneen valaisimet ovat samanlaisia ja ne on asennettu säännölliseksi kuvioksi, jolloin valaistusasennus on kuvattavissa pelkästään valaisinten määrällä.

Valaisinten lukumäärä ei vaikuta UGR:n keskimääräiseen arvoon. Jos huoneeseen lisätään valaisimia, kasvaa häikäisylähteiden lukumäärä, mutta samalla nousee myös taustaluminanssi, joten UGR:n arvo ei muutu sanottavasti. On kuitenkin huomattava, että valaisimia lisättäessä niiden välimatka toisiinsa nähden pienenee, mistä johtuen UGR:n arvot eivät muutu eri pisteissä enää yhtä paljon. Tästä syystä UGR:n ääriarvot lähestyvät UGR:n keskiarvoa, eli häikäisy (jos sitä on) tasoittuu.

Valaisinten lisääminen nostaa huoneen valaistustasoa. Koska UGR ei kasva, voidaan päätellä, että UGR-yhtälö ei tässä tapauksessa toteuta kovarianssiehtoa, jonka mukaan häikäisyn pitäisi kasvaa valaistustason mukana.

1.6.1.3 Valaisinten ominaisuuksien vaikutus

Valaisimen koko

Valaisimen koko ei vaikuta UGR:n arvoihin, jos se ei vaikuta valaisimen luminanssiin tai muihin valaisimen ominaisuuksiin, jotka on kuvattu tässä luvussa.

Jos esimerkiksi vaihdetaan 36 watin loistelampuille suunnitellut valaisimet 18 watin loistelampuille suunniteltuihin valaisimiin, joiden valaiseva pinta-ala on noin puolet entisistä, puolittuu jokaisen valaisimen avaruuskulma, mutta samalla puolittuu myös valaisinten valovirta. Niinpä UGR:n arvo ei tässä tapauksessa muutu.

Valaisimen luminanssi

Valaisimen luminanssilla on olennainen osuus UGR:n muodostumisessa, ja korkeammat luminanssit merkitsevät korkeampia UGR-arvoja. Luminanssin kaksin-

kertaistuminen kasvattaa UGR:ää 2,4 yksiköllä. Tässä oletetaan, että valaisinten määrän kasvu on suoraan verrannollinen taustaluminanssin kasvuun.

$$\text{Siis } 8 \cdot \lg[(2L_s/L_s)^2 \cdot (L_b/2L_b)] = 8 \cdot \lg[2] \approx 2,4.$$

Valon ylöspäin suuntautuva komponentti

Tärkeä näkökohta valojakaumaa tarkasteltaessa on sen valaisimesta ylöspäin suuntautuva komponentti. Jos valoa pääsee valaisimesta ylöspäin, pienenee valaisimen luminanssi ja taustaluminanssi kasvaa. Molemmat tekijät vaikuttavat pienentävästi UGR:n arvoihin. Yleisesti on laskettavissa, että jokainen 10%:n osuus, joka valosta suuntautuu ylöspäin, pienentää UGR:ää noin yhdellä yksiköllä. Tarkempi arviointi vaatii kuitenkin olosuhteiden täsmällisempää tuntemista.

$$\text{Siis } 8 \cdot \lg[(0,9L_s/L_s)^2 \cdot (L_b/1,1L_b)] = 8 \cdot \lg[0,73] \approx -1,1.$$

1.6.2 Valaisinkohtaiset UGR-taulukot

Kuten NB-menetelmässäkin, valaisinvalmistaja tuottaa ja toimittaa valaisimen mukana taulukon, jossa esitetään valaisimen UGR-arvot eri heijastussuhdeyhdistelmillä ja huoneen mitoilla muiden teknisten tietojen yhteydessä. Taulukon täytyy koostua kahdesta osasta, joista toisessa on tiedot valaisimesta katsottaessa sitä poikittaisesta suunnasta ja toisessa katsottaessa sitä pitkittäisestä suunnasta. Taulukossa esitettävät UGR-arvot ovat korjaamattomia UGR-arvoja, mikä vastaa häikäisyindeksimenetelmässä käytettyä taulukointitapaa. Taulukossa 7 on esitetty esimerkki tällaisesta UGR-taulukosta, jota käytettäessä on otettava huomioon kolme kokeellisesti määritettyä korjaustekijää:

- 1) Monissa loistelamppuvalaisimissa on mahdollista käyttää lamppuja, joilla on erilainen valovirta, mutta silti sama suhteellinen valonjakokäyrä. Tällöin luminanssijakauman absoluuttiarvot ovat lampun valovirran funktioita. Todelliselle valovirralle voidaan laskea UGR-arvoon lisättävä korjaustekijä b_ϕ :

$$b_{\phi} = 8 \cdot \lg(\phi / \phi_0) \quad (18)$$

jossa ϕ = lampun valovirta [lm]

ϕ_0 = taulukossa esitetty lampun valovirta (yleensä $\phi_0 = 1000$ lm) [lm].

- 2) Samantyyppiset valaisimet voivat olla erikokoisia, mutta niillä voi silti olla sama suhteellinen valonjako. Esimerkiksi, jos valaisin on suunniteltu eritehoisia loistelamppuja varten, eri lampuille on olemassa eripituinen valaisin. Taulukossa on tällöin oltava korjaustermit kullekin lampputeholle (ks. taulukko 7). Perustehon korjaustermi on tällöin nolla (esimerkkitaulukossa perusteho on 36 W).
- 3) Jos asennuksessa valaisinvälit ovat pieniä, UGR:n arvot eivät juuri vaihtelee havaitsijan sijainnin muuttuessa, koska jokaisessa sijaintipisteessä häikäisyä tuottaa useampi valaisin. Kuitenkin tietyntyyppisillä valaisimilla, etenkin ns. lepakonsiipityyppisillä, jos niiden välinen etäisyys on suurempi, UGR:n arvo vaihtuu jaksottaisesti havaitsijan sijainnin mukana. Usein häikäisy on maksimissaan, kun valaisin on noin 45° kulmassa havaitsijan edessä. Voidaan ajatella, että UGR:n arvo vaihtelee miniminsä ja maksiminsa välillä, ja näiden väliin osuu keskiarvo, joka saadaan siitä UGR:n arvosta, joka syntyy pienemmällä valaisinvälillä. Tämän takia valaisintaulukot perustuvat melko pieneen väliin, 0,25H. Suurempien välien vaihtelu saadaan tutkimalla havaitsijan eri sijainteja valaisimen vaikutusalueella. Tämä voidaan tehdä muutamalla eri välillä, mielellään ainakin arvoilla 1H, 1,5H ja 2H, jotka liitetään taulukkoon (ks. taulukko 7).

Taulukko 7. Korjaamattomien UGR-arvojen taulukko, joka pätee valaisimelle, jossa on yksi 36 W loistelamppu, heijastava ritilä ja 60° cut-off-kulma molemmilla päätasoilla. Havaittajan sijainnista riippuvat UGR:n muutokset on esitetty, samoin korjaustermit saman tyyppin 18 W ja 58 W lampuille.

Korjaamattomat häikäisyindeksit (lampun valovirralla 1000 lm)											
Katon heijastussuhde		0,70	0,70	0,50	0,50	0,30	0,70	0,70	0,50	0,50	0,30
Seinien heijastussuhde		0,50	0,30	0,50	0,30	0,30	0,50	0,30	0,50	0,30	0,30
Työtason heijastussuhde		0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Huoneen dimensiot		Poikittainen katsesuunta					Pitkittäinen katsesuunta				
X	Y										
2H	2H	14,4	15,4	14,6	15,6	16,0	13,5	14,5	13,7	14,7	15,1
3H		14,3	15,3	14,6	15,5	15,8	13,3	14,3	13,6	14,5	14,8
4H		14,2	15,1	14,5	15,3	15,6	13,2	14,1	13,5	14,3	14,6
6H		14,0	14,8	14,4	15,1	15,4	13,0	13,8	13,4	14,1	14,4
8H		14,0	14,8	14,4	15,1	15,4	13,0	13,8	13,4	14,1	14,4
12H		14,0	14,8	14,3	15,1	15,4	13,0	13,8	13,3	14,1	14,4
4H	2H	14,4	15,3	14,7	15,5	15,8	13,6	14,5	13,9	14,7	15,0
3H		14,3	15,1	14,6	15,3	15,7	13,4	14,2	13,7	14,4	14,8
4H		14,1	15,0	14,5	15,2	15,7	13,2	14,1	13,6	14,3	14,8
6H		14,1	14,8	14,6	15,1	15,6	13,2	13,9	13,7	14,2	14,7
8H		14,0	14,6	14,6	15,0	15,5	13,1	13,7	13,7	14,1	14,6
12H		14,0	14,6	14,6	15,1	15,4	13,1	13,7	13,7	14,2	14,5
8H	4H	14,1	14,7	14,7	15,1	15,6	13,2	13,8	13,8	14,2	14,7
6H		14,1	14,7	14,7	15,0	15,4	13,2	13,8	13,8	14,1	14,5
8H		14,0	14,4	14,5	14,8	15,3	13,1	13,5	13,6	13,9	14,4
12H		14,0	14,4	14,5	14,7	15,3	13,1	13,5	13,6	13,8	14,4
12H	4H	14,1	14,7	14,7	15,1	15,6	13,2	13,8	13,8	14,2	14,7
6H		14,0	14,4	14,5	14,8	15,3	13,1	13,5	13,6	13,9	14,4
8H		14,0	14,4	14,5	14,7	15,3	13,1	13,5	13,6	13,8	14,4
Muutokset havaittajan sijainnissa				Väli S = 1H			+0,9/2,1			+0,8/-1,5	
				1,5H			+2,2/7,9			+2,6/-12,1	
				2H			+4,0/-16,0			+3,2/-22,9	
Korjaustermit muille samantyyppisille valaisimille											
1 x 18W: +2,4				1 x 36W: 0				1 x 58W: -0,8			

1.6.3 Standardi-UGR-taulukot

Luvussa 1.6.2 esitetty taulukointitapa vie tilaa, minkä vuoksi on otettu käyttöön standardi-UGR-taulukot (BK-taulukot, taulukko 8), joissa esitetään myös korjaamattomat UGR-arvot /33/. NB-menetelmässä korjaamattomia UGR-arvoja vastaavat alkuhäikäisyindeksit. BK-taulukot on saatu laskemalla valaisinkohtaisista UGR-taulukoista valaisimille 10 BZ-valovoimajakautamaa, jotka ovat olleet perustana aikaisemmalle British IES:n BZ-menetelmälle (liite 5) ja edelleen NB-menetelmälle.

Laskenta tuotti 10 taulukkoa ja näistä taulukoista saatiin interpoloimalla 14 BK-taulukkoa. Taulukossa BK00 UGR saa kaikilla sijainneilla arvon 20, BK01:ssä UGR vaihtelee välillä 19 – 20, BK02:ssa välillä 18 – 20 jne. Täten kaikki BK-taulukot vastaavat samaa kiusahäikäisyä, 20, huoneissa, joiden suhteelliset dimensiot x ja y ovat suuret. Lisäksi BK-taulukot ovat sellaisia, että taulukon kattama UGR-alue kasvaa yksikön askeleella siirryttäessä taulukosta seuraavana sarjassa olevaan taulukkoon.

Tietokoneohjelma tuottaa valaisintaulukon niin, että se laskee varsinaisen valaisinkohtaisen taulukon ja sallii viittauksen BK-taulukkoon vain silloin, kun BK-taulukko ja valaisinkorjaus voivat korvata varsinaisen UGR-taulukon, jonka sijaintivirhe on korkeintaan yhden yksikön suuruinen. Täten standardi-UGR-taulukoiden tarkoituksena ei ole säästää työtä valaisintaulukon laskennassa, vaan ainoastaan tilaa valaisintaulukossa. Niissä harvoissa tapauksissa, jolloin BK-taulukoiden käyttö johtaa liian suuriin virheisiin, on valaisintaulukossa esitettävä varsinainen valaisinkohtainen UGR-taulukko.

BK-taulukoita käytettäessä riittää, kun häikäisytaulukossa viitataan siihen BK-osa-taulukkoon, jota käytetään, sekä annetaan tarvittavat korjaustermit lampputehoja ja havaitsijan sijaintia varten (taulukko 9). Etuna on NB-menetelmään verrattuna se, ettei tarvita eri taulukoita valaisimen pitkittäis- ja poikittaissuuntia varten.

Taulukko 8. Standarditaulukot korjaamattomille UGR:n arvoille (BK-tilukot).

BK00 — 20,0 kaikilla sijainneilla —

BK01 x	2	3	4	6	8	12
y 2	19,0	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5
3	19,3	19,7	19,9	19,9	19,9	19,9
4	19,4	19,8	19,9	20,0	20,0	20,0
6	19,4	19,8	19,9	20,0	20,0	20,0
8	19,4	19,8	19,9	20,0	20,0	20,0
12	19,4	19,8	19,9	20,0	20,0	20,0

BK08 x	2	3	4	6	8	12
y 2	12,0	12,8	13,4	13,7	13,7	13,8
3	14,1	15,0	15,7	16,1	16,3	16,3
4	15,0	16,0	16,8	17,3	17,5	17,6
6	15,9	16,9	17,8	18,4	18,7	18,9
8	16,2	17,3	18,2	18,9	19,2	19,5
12	16,5	17,6	18,5	19,3	19,6	20,0

BK02 x	2	3	4	6	8	12
y 2	18,0	18,5	18,7	18,8	18,8	18,8
3	18,7	19,2	19,5	19,6	19,6	19,6
4	18,8	19,4	19,7	19,8	19,9	19,9
6	18,9	19,5	19,8	19,9	20,0	20,0
8	18,9	19,5	19,8	20,0	20,0	20,0
12	18,9	19,5	19,8	20,0	20,0	20,0

BK09 x	2	3	4	6	8	12
y 2	11,0	11,9	12,5	12,8	12,9	12,9
3	13,3	14,3	15,0	15,4	15,6	15,7
4	14,4	15,4	16,2	16,8	17,0	17,1
6	15,3	16,4	17,3	18,0	18,4	18,6
8	15,8	16,9	17,8	18,6	19,0	19,3
12	16,1	17,3	18,3	19,1	19,6	20,0

BK03 x	2	3	4	6	8	12
y 2	17,0	17,6	17,9	18,0	18,0	18,0
3	17,9	18,6	18,9	19,1	19,1	19,2
4	18,2	18,9	19,3	19,5	19,6	19,6
6	18,4	19,1	19,5	19,8	19,8	19,9
8	18,4	19,1	19,6	19,8	19,9	19,9
12	18,5	19,2	19,6	19,9	19,9	20,0

BK10 x	2	3	4	6	8	12
y 2	10,0	10,9	11,5	11,9	12,0	12,0
3	12,5	13,5	14,2	14,8	14,9	15,0
4	13,7	14,7	15,6	16,2	16,5	16,6
6	14,8	15,9	16,9	17,7	18,0	18,3
8	15,3	16,5	17,5	18,4	18,8	19,2
12	15,8	17,0	18,1	19,0	19,5	20,0

BK04 x	2	3	4	6	8	12
y 2	16,0	16,6	17,0	17,1	17,2	17,2
3	17,2	17,9	18,4	18,6	18,7	18,7
4	17,6	18,4	18,9	19,2	19,2	19,3
6	17,9	18,7	19,2	19,6	19,7	19,7
8	18,0	18,8	19,3	19,7	19,8	19,9
12	18,0	18,8	19,4	19,8	19,9	20,0

BK11 x	2	3	4	6	8	12
y 2	9,0	9,9	10,6	11,0	11,1	11,1
3	11,6	12,7	13,5	14,0	14,2	14,3
4	12,9	14,0	14,9	15,6	15,9	16,1
6	14,2	15,4	16,4	17,2	17,6	18,0
8	14,9	16,1	17,1	18,1	18,5	19,0
12	15,5	16,7	17,8	18,9	19,4	20,0

BK05 x	2	3	4	6	8	12
y 2	15,0	15,7	16,1	16,3	16,3	16,3
3	16,5	17,3	17,8	18,0	18,1	18,2
4	17,0	17,8	18,4	18,8	18,9	18,9
6	17,4	18,3	18,9	19,3	19,5	19,6
8	17,5	18,4	19,1	19,5	19,7	19,8
12	17,6	18,5	19,2	19,6	19,8	20,0

BK12 x	2	3	4	6	8	12
y 2	8,0	8,9	9,6	10,1	10,2	10,2
3	10,8	11,8	12,7	13,2	13,5	13,6
4	12,2	13,3	14,2	15,0	15,3	15,5
6	13,7	14,9	15,9	16,8	17,2	17,6
8	14,4	15,7	16,8	17,7	18,3	18,8
12	15,2	16,5	17,6	18,7	19,4	20,0

BK06 x	2	3	4	6	8	12
y 2	14,0	14,7	15,2	15,4	15,5	15,5
3	15,7	16,5	17,1	17,4	17,5	17,6
4	16,4	17,3	17,9	18,3	18,4	18,5
6	16,9	17,8	18,5	19,0	19,2	19,4
8	17,1	18,0	18,8	19,3	19,5	19,7
12	17,2	18,2	18,9	19,5	19,8	20,0

BK13 x	2	3	4	6	8	12
y 2	7,0	8,0	8,7	9,2	9,3	9,4
3	10,0	11,1	11,9	12,6	12,8	13,0
4	11,6	12,7	13,7	14,4	14,8	15,0
6	13,2	14,4	15,5	16,5	16,9	17,3
8	14,1	15,3	16,5	17,5	18,1	18,6
12	15,0	16,3	17,5	18,6	19,3	20,0

BK07 x	2	3	4	6	8	12
y 2	13,0	13,8	14,3	14,6	14,6	14,6
3	14,0	15,8	16,4	16,8	16,9	17,0
4	15,7	16,7	17,4	17,8	18,0	18,1
6	16,4	17,4	18,2	18,7	19,0	19,1
8	16,6	17,7	18,5	19,1	19,4	19,6
12	16,8	17,9	18,7	19,4	19,7	20,0

BK14 x	2	3	4	6	8	12
y 2	6,0	7,0	7,8	8,4	8,6	8,6
3	9,3	10,4	11,3	12,0	12,3	12,5
4	11,0	12,2	13,2	14,0	14,4	14,7
6	12,9	14,1	15,2	16,2	16,7	17,2
8	13,8	15,1	16,3	17,4	17,9	18,5
12	14,8	16,1	17,4	18,6	19,3	20,0

Taulukko 9. Lyhennetty häikäisytaulukko esitettynä BK-taulukoiden avulla.

Katsesuunta	Poikittainen	Pitkittäinen
Standarditaulukko	BK0	BK0
Valaisinkorjaukset		
18W	-3,1	-4,0
36W	-5,5	-6,4
58W	-6,3	-7,2
Muutokset havaitsijan sijainnissa		
S = 1H	+0,9/2,1	+0,8/-2,1
1,5H	+2,2/7,9	+2,6/-12,1
2H	+4,0/-16,0	+3,2/-22,9

BK-taulukoissa taustaluminanssi on oletettu vakioksi. Täten taulukot ovat pelkäs-
tään huoneen dimensioiden x ja y funktioita. Koska näissä taulukoissa ei enää esite-
tä heijastussuhteita, on otettava käyttöön uusi korjaustermi, jotta taustaluminanssi
voidaan ottaa huomioon. Korjaustermi laskemisessa käytetään valaistushyötysuh-
teita, jotka on annettu valaisintaulukossa (taulukko 10). Korjaustermi lasketaan yh-
tälöstä

$$b_L = -8 \cdot \lg L_R \quad (19)$$

jossa L_R = suhteellinen taustaluminanssi, jolle pätee seuraava yhtälö:

$$L_R = 6 \cdot UF_{\text{tot}} - 5 \cdot UF_d \quad (20)$$

jossa UF_{tot} = valaistushyötysuhde; hyötysuhde, kun käytetään todellisia heijas-
tussuhteita

UF_d = suoran valaistuksen hyötysuhde; heijastussuhteet nolliä.

Valaistushyötysuhdetta tarvitaan aina laskettaessa haluttua valaistusvoimakkuut-
ta, joten suoran valaistuksen hyötysuhteen, L_R :n ja b_L :n laskeminen ei tuo kovin pal-
jon lisätyötä. Yhtälö 20 on likimääräinen ja perustuu yksinkertaisiin oletuksiin.
Tarkkuus on kuitenkin niin hyvä, ettei merkittävää ylimääräistä epätarkkuutta
esiinny.

Taulukko 10. Valaistushyötysuhdetaulukko.

	Heijastussuhteet								
Katto/valaisinten taso	0,70	0,70	0,70	0,50	0,50	0,50	0,30	0,30	0
Seinät	0,50	0,30	0,10	0,50	0,30	0,10	0,30	0,10	0
Työtaso	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0

Huoneindeksi (k)	Valaistushyötysuhteet (%)								
0,60	22	17	13	20	15	12	13	11	8
0,80	28	22	18	24	20	16	18	15	11
1,00	32	27	22	28	24	20	21	18	14
1,25	37	31	27	32	28	24	24	21	17
1,50	40	35	30	35	31	27	27	24	19
2,00	45	40	36	40	36	32	31	29	23
2,50	49	44	40	43	39	36	34	32	25
3,00	51	47	43	45	42	39	37	34	27
4,00	55	51	48	48	45	43	40	38	30
5,00	57	54	51	50	48	45	42	40	32

1.6.4 UGR-käyrät

UGR-yhtälöön perustuvan luminanssikäyrämenetelmän käyrät on muodostettu viidestä BZ-valovoimajakaumakäyrästä BZ1 – BZ5. Näiden käyrien oletetaan edustavan valaisimia, joiden ritilät on muotoiltu eri tavoin niin, että valojakauma on jokaisella BZ-luokalla erilainen. Käyriä on helppo käsitellä, koska valovoimajakaumat noudattavat yksinkertaisia kaavoja, jotka voidaan muuntaa myös luminansseiksi. Lisäksi kosinijakaumaa (BZ5) voidaan käyttää eri katsekulmilla (γ) valaisimille, joissa on heijastavat paraboliset ritilät.

Aluksi häikäisyindeksien laskennat suoritettiin asennuksissa, joiden dimensiot olivat $12 \times 12 H^2$, $8 \times 8 H^2$, $6 \times 6 H^2$, $4 \times 4 H^2$, $3 \times 3 H^2$ ja $2 \times 2 H^2$, joissa H on valaisimen asennuskorkeus silmästä. Näitä laskelmia varten valaisinten luminanssikäyriä (L) nostettiin log- γ -diagrammissa vaakasuunnassa ja täten niiden asteikot muuttuivat niin, että jokaisen käyrän häikäisyindeksin arvoksi tuli tasan 20. Huoneen heijastussuhteiden oletettiin olevan normaalia suuruusluokkaa, eli ne olisivat vertailukelpoisia Söllnerin tutkimusten kanssa /13/.

Esimerkki diagrammeista BZ3, BZ5 ja BZ5 leikkauskulmalla 60° on esitetty kuvassa 10. Jokaista huonekokoa vastaa kussakin diagrammissa yksi käyrä.

Luminanssin rajakäyrä edellä kuvatuille olosuhteille eli UGR:n arvolle 20 on määritetty piirtämällä kuvan 10 diagrammeihin ylimääräinen suora, joka edustaa parhaiten kaikkia BZ1 – BZ5:n käyriä. Kuten nähdään, tämä arvioitu tangentti ei kaikissa tapauksissa kosketa valaisinten luminanssikäyriä aiheuttaen virhettä, joka ei kuitenkaan koskaan ole suurempi kuin yksi UGR-yksikkö. Tutkittaessa BZ6:tta, joka edustaa valaisimia, joilla on valaistuja pystysuoria pintoja, havaittiin, että rajakäyrä toimii suhteellisen hyvin tällaisilla valaisimilla ja vieläpä molempiin katsesuuntiin. Siksi ei ole tarvetta käsitellä katsesuuntia erikseen, kuten luminanssikäyrämenetelmässä on tehty /13/.

Kuvan 10 luminanssirajakäyrät voidaan esittää yhtälöllä, joka sisältää rajaluminanssin (L) ja katsekulman (γ). Rajaluminanssi on valaisimen luminanssin maksimiarvo kussakin katsekulmassa ($45^\circ - 85^\circ$). Jotta valaisin täyttäisi halutun UGR:n raja-arvon (kuvassa 10 UGR:n raja-arvo on 20), ei valaisimen luminanssi saa missään katsesuunnassa ylittää rajaluminanssia, jonka määrää siis luminanssirajakäyrä.

$$\lg L = 4 + 0,125 \cdot \text{UGR} - 0,0385 \cdot \gamma \quad (21)$$

jossa UGR = häikäisyn UGR-raja-arvo

γ = katsekulma [$^\circ$].

Tätä yhtälöä käyttäen voidaan laskea luminanssikäyrät millä tahansa UGR:n arvolla ja piirtää vastaavat diagrammit. Tuloksena saatavat häikäisynrajoituskäyrät ovat nimeltään UGR-käyriä. Käytännöllistä on käyttää vain osaa UGR:n raja-arvoista, jolloin saadaan aikaan brittiläistä menetelmää (BGI) vastaavat käyrät, joiden UGR-arvot ovat 16, 19, 22, 25 ja 28. Tällainen UGR-diagrammi on kuvassa 11.

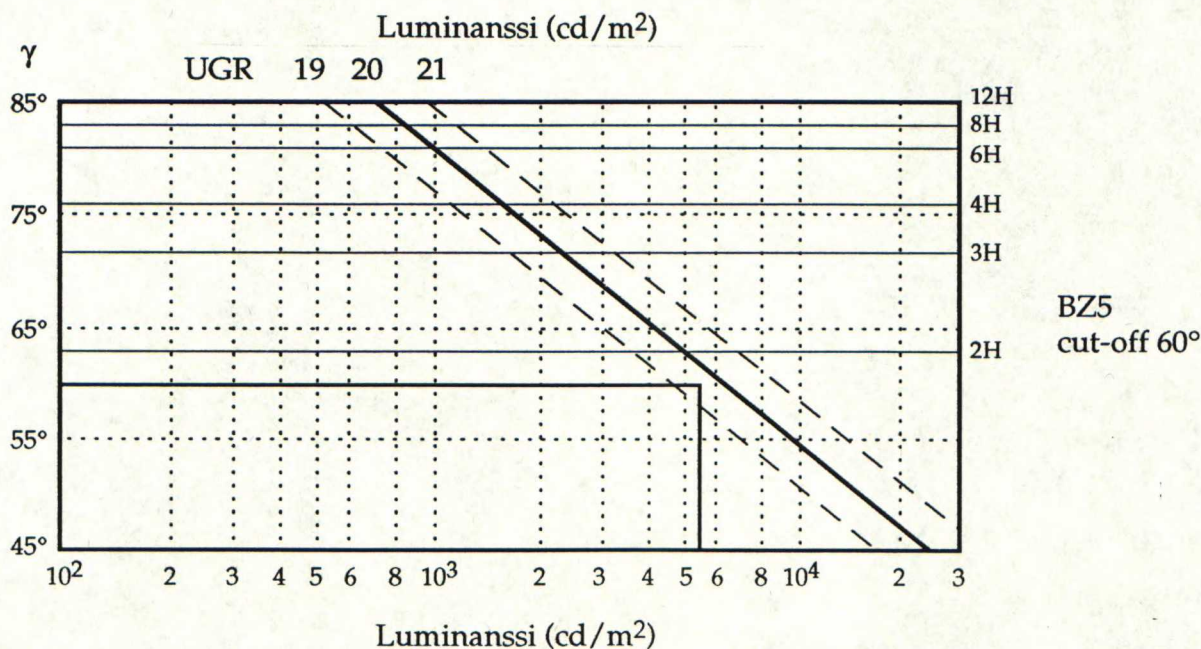
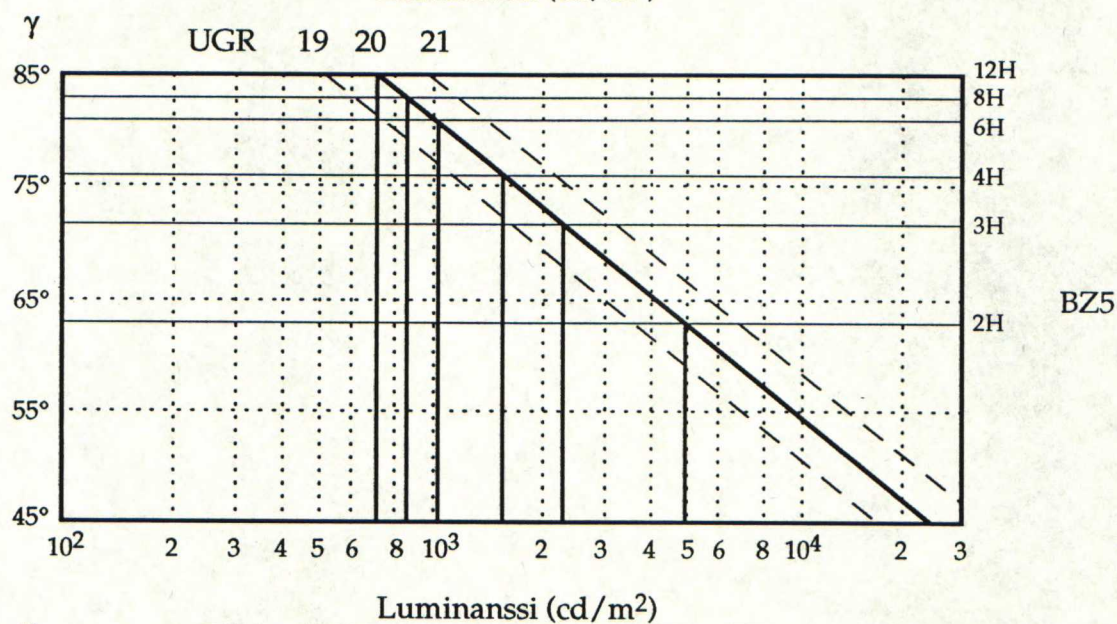
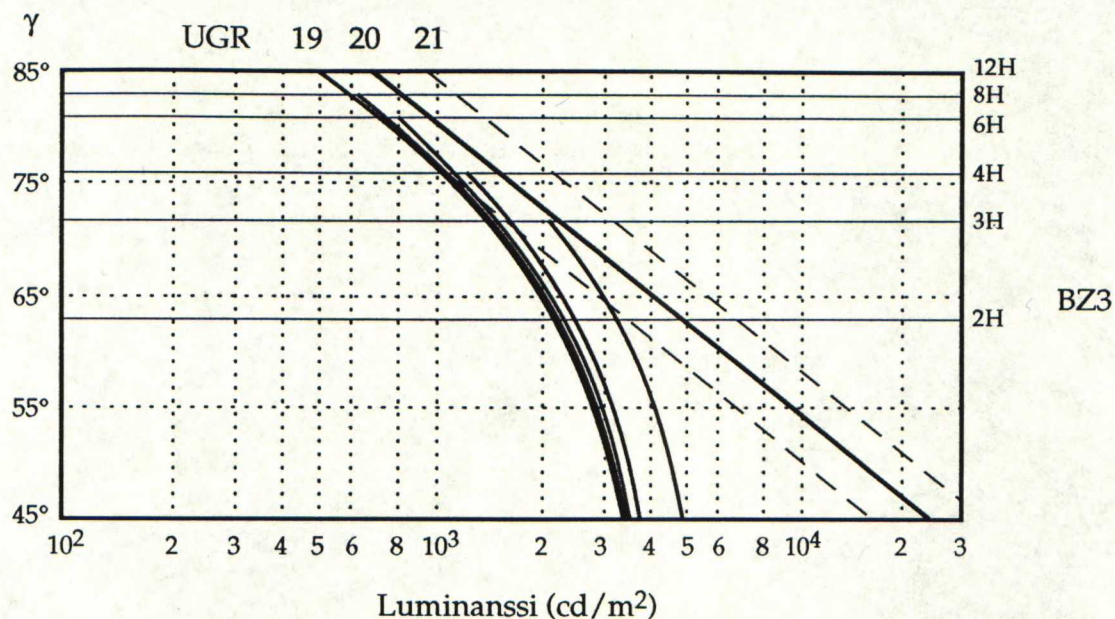
Menetelmän käyttö ja rajoitukset ovat samat kuin luminanssikäyrämenetelmässä (luku 1.1.3). UGR-käyriä ei voi käyttää valaisimille, jotka tuottavat paljon ylöspäin suunnattua valoa.

UGR:n muutokset havaitsijan sijainnin muuttuessa voidaan ottaa huomioon lisäämällä varjostettu alue UGR-käyrien alle (kuva 12). Varjostetun alueen alareuna noudattaa yhtälöä (päteee alueella $45^\circ < \gamma < 75^\circ$)

$$\lg L = 3,0625 + 0,125 \cdot \text{UGR} - 0,026 \cdot \gamma \quad (22)$$

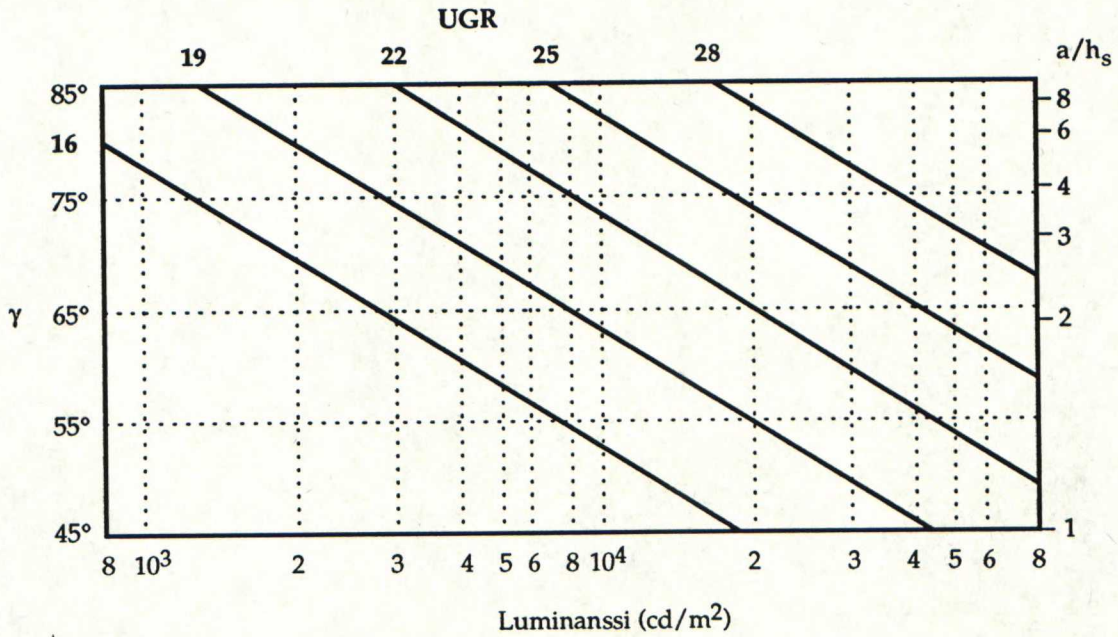
jossa UGR = häikäisyn UGR-raja-arvo

γ = katsekulma [$^\circ$].

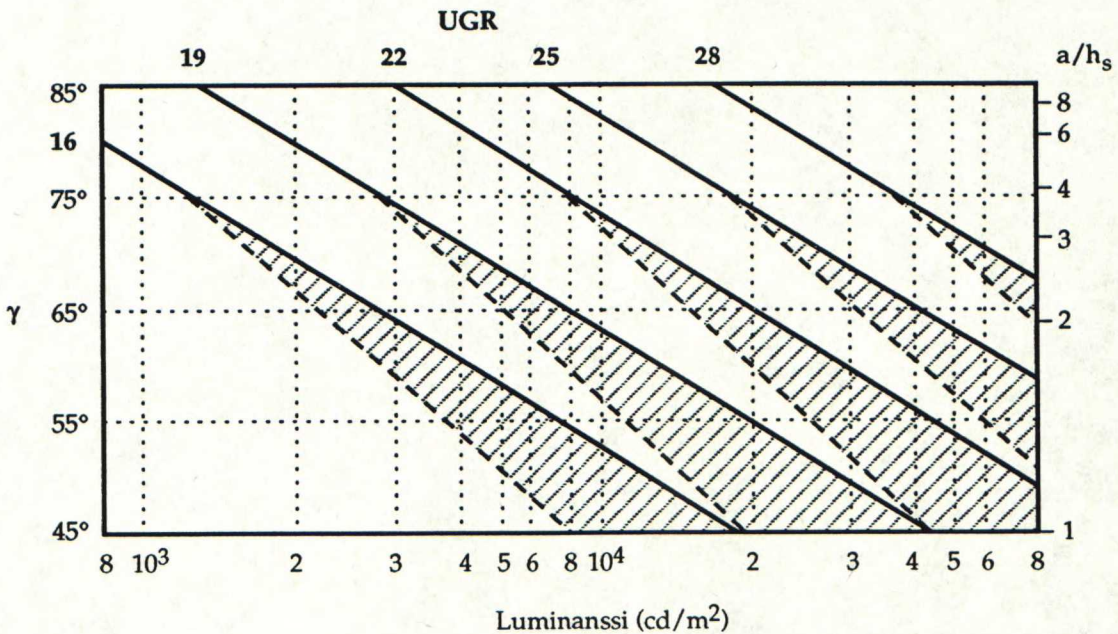


Kuva 10. UGR:n arvon 20 tuottavat luminanssikäyrät valaisimille, jotka noudattavat käyriä BZ3, BZ5 ja BZ5 leikkauskulmalla 60°. Laskeva yhtenäinen suora kussakin kuvassa on rajakäyrä UGR:n arvolla 20. Virheiden huomioimiseksi kuviin on lisätty katkoviivat arvoille UGR = 19 ja UGR = 21.

Varjostettua aluetta käytetään niin, että kun valaisinten välit eivät ole pieniä ja halutaan tutkia mitä tahansa sijaintia huoneessa, valaisimen luminanssikäyrän pitää sijoittua varjostetun alueen vasemmalle puolelle.



Kuva 11. UGR-käyrädiagrammi, joka on laskettu UGR:n sarjalle 16 – 28.

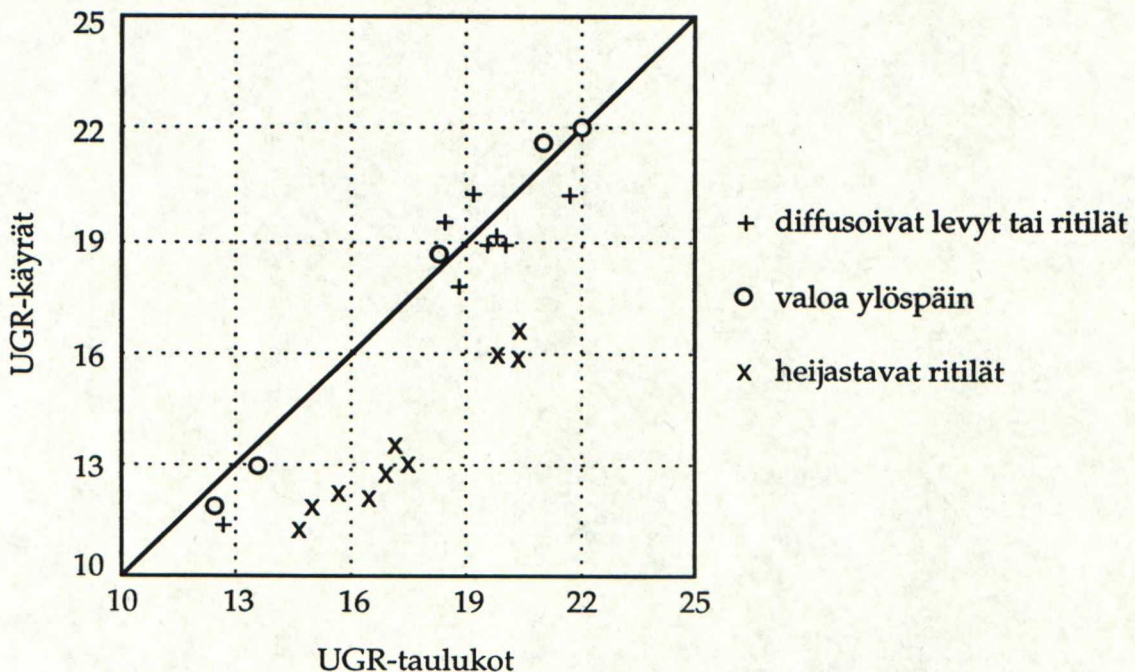


Kuva 12. UGR-käyrädiagrammi, jossa otetaan huomioon havaitsijan sijainnin muuttuminen. Jos valaisinten välit eivät ole pieniä, valaisimen luminanssikäyrän pitää jäädä viivoitettun alueen vasemmalle puolelle.

UGR-käyrien ja UGR-taulukoiden antamien arvojen vertailemiseksi määritettiin 23 valaisimen molemmat UGR-arvot. Valaisimista 8:ssä oli diffusoivat levyt tai ritilät, 10:ssä heijastavat ritilät ja 5:ssä ylöspäin suunnattua valoa. Taulukkoarvot määritettiin huoneelle, jonka koko oli 12 H x 8 H ja heijastussuhteet 0,7 katolle, 0,5 seinille ja 0,2 työtasolle. Käyrien arvot määritettiin aluella $45^\circ < \gamma < 85^\circ$. Vertailu on esitetty kuvassa 13.

Valaisimille, joissa oli diffusoivat levyt tai ritilät sekä valaisimille, joista tuli ylöspäin suunnattua valoa, molemmat UGR:n arvot vastasivat toisiaan ± 1 yksikön tarkkuudella, mitä voidaan pitää hyvänä tuloksena. Toisaalta kävi ilmi, että valaisimilla, joissa oli heijastavat ritilät, UGR-käyrien antamat arvot olivat 3 – 4 yksikköä pienempiä kuin taulukkoarvot. Syynä tähän on se, että rajakäyrät on määritetty huoneille, joissa on korkeahkot heijastussuhteet, mikä aiheuttaa taustaluminanssien suuremmat arvot. Kuitenkaan tällaisilla valaisimilla valaistut huoneet eivät ole yhtään kirkkaampia, koska valaisimet antavat varsin vähän suoraa valoa seinille eivätkä yhtään kattoon. Vastaavasti häikäisyvaikutus on arvioitua suurempi, koska valaisimen luminanssin absoluuttiset arvot ovat suurempia kuin on oletettu.

Tämä ilmiö näyttää olevan huomattava haitta UGR-käyrien käytölle. Jos halutaan tarkkuutta häikäisyn arviointiin, ei UGR-käyriä voida käyttää. Siksi valaistussuunnittelussa suositellaan yleensä käytettäväksi UGR-taulukoita. Kuitenkin häikäisyä aiheuttaviksi epäiltävien asennusten tarkastuksissa UGR-käyriä kannattaa käyttää.



Kuva 13. Erityyppisten valaisinten UGR-arvojen vertailua, kun käytetään UGR-taulukoita ja UGR-käyriä.

1.7 UGR-mittaukset toimistotiloissa

UGR-mittaukset tehtiin kevään 1994 aikana Teknillisen korkeakoulun tiloissa Espoossa ja Näkövammaisten keskusliiton tiloissa Helsingissä. UGR:n lisäksi mitattiin BGI-arvot, joita käytetään nykyisin häikäisyn arvioinnissa Suomessa. Samalla tehtiin häikäisyyn ja näkemiseen liittyviä mittauksia. Tilat, mittausmenetelmät ja mittalaitteet sekä pohjapiirrokset ja yleiset mittaustulokset on esitetty liitteissä 3 ja 4.

Mittaukset tehtiin pelkässä keinovalossa siten, että huoneiden verhot olivat mahdollisimman hyvin kiinni, eli suoraa auringonvaloa ei päässyt sisään. Mittaukset pyrittiin tekemään siten, että tulokset vastaisivat parhaalla mahdollisella tavalla työpaikalla työskentelevän työntekijän havaintoja.

Mittaustiloja oli viisi, joista yhdessä mittaukset tehtiin kahteen eri katsesuuntaan. On huomattava, että huoneet I344A ja I343 olivat lähes samanlaiset, tärkeimpänä erona huoneen I343 valaisimista poistettut lamelliritilät. Taulukossa 11 on esitetty lyhyt vertailu tilojen UGR-arvoista. Kuudesta tilanteesta yhdessä UGR:n ja BGI:n arvo ei toteuttanut BGI-suositusarvoa (virallisia UGR-suosituksia ei ole julkaistu). Huoneen I343 valaistus ei täytä näyttöpäätetyölle asetettua vaatimusta $BGI \leq 16$. Täydelliset mittaustulokset on esitetty liitteessä 6.

Taulukko 11. Mittaustilojen mitatut UGR- ja BGI-arvot. BGI-suosituksia on esitetty taulukossa 3. Näkyvien valaisinten lukumäärä = näkökentässä olevien valaisinten lukumäärä, häikäisyä havainneet = kysymykseen "esiintyykö häikäisyä työtilanteessa" myöntävästi vastanneet.

Tila	Näkyvien valaisinten lukumäärä	Häikäisyä havainneet [%]	BGI	UGR
Huone I344A	3	60,0	8,3	9,4
Huone I343	3	50,0	16,9	18,2
Kirjaamo K005	6	20,0	11,2	12,2
Opintotoimisto Y223 suunta 1	6	100,0	13,9	14,5
Opintotoimisto Y223 suunta 3	7	100,0	12,9	13,8
Näkövammaisten keskusliitto	4	15,0	11,1	11,9

Opintotoimistossa kyselyssä oli mukana vain neljä henkilöä, muissa tiloissa 10 – 13 henkilöä, joten tässä suhteessa nämä tilat eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Näkövammaisten keskusliitossa koehenkilöt olivat heikkonäköisiä, eikä heidän tuloksiaan voida verrata normaalinäköisten tuloksiin.

Häikäisyä arvioitiin 4 kohdan asteikolla määritelmillä: ei häikäisyä, häikäisy havaittavaa, häikäisy epämiellyttävää sekä häikäisy sietämätöntä. Arvio häikäisystä annettiin työtilanteessa, johon sisältyi lukemista, päätetyötä ja vaakasuora katsesuunta eteenpäin. Missään tilassa häikäisyä ei arvioitu sietämättömäksi ja ne koehenkilöt, jotka havaitsivat häikäisyä, arvioivat useimmiten häikäisyn havaittavaksi mutta ei epämiellyttäväksi. Selvä poikkeus tästä säännöstä on opintotoimisto, jossa enemmistö työntekijöistä piti häikäisyä epämiellyttävänä. Huoneessa I343 yksi henkilö piti häikäisyä epämiellyttävänä. Täydelliset tiedot työympäristökyselystä on esitetty viitteessä /29/.

UGR:n soveltuvuus häikäisyn arviointiin

UGR soveltuu häikäisyn arviointiin, kun halutaan määritellä raja-arvoja erilaisille työtilanteille. Tällä hetkellä ei kuitenkaan ole olemassa virallisia UGR-suosituksia, joten tässä työssä on tukeuduttu BGI-suosituksiin, koska UGR-menetelmä on kehitetty BGI-menetelmän pohjalta ja arvot ovat melko lähellä toisiaan. BGI-suositustaulukosta nähdään helposti, onko UGR (tai BGI) alle suositusarvon määritellyssä työssä.

Suomessa käytettyyn NB-menetelmään verrattuna UGR-menetelmässä on monipuolisemmat mahdollisuudet tutkia häikäisyä riippuen siitä, millaiset mittalaitteet on käytettävissä. Toisaalta NB-menetelmä antaa monipuolisempaa tietoa tutkittavan tilan valaistuksesta, kuten keskimääräisen valaistusvoimakkuuden ja valaistuksen tasaisuuden, jolloin on mahdollista saada laajempi kuva tilan valaistuksesta.

UGR:n laskemiseen tarvittavien suureiden mittaaminen on yhtä hankalaa, kuin VCP-menetelmän tapauksessa, sillä mitattavat suureet ovat samat.

Mittaustulosten käsittely on helppo hoitaa tietokoneella, kuten muissakin menetelmissä. Jos tietokonetta ei ole käytettävissä, on UGR-menetelmä hieman helpompi kuin muut menetelmät. Jos UGR-arvot määritetään taulukoista ja diagrammeista, työ helpottuu selvästi käsinlaskentaan verrattuna. Lisäksi UGR-taulukot on suunniteltu siten, että niiden käyttäminen olisi mahdollisimman yksinkertaista.

Saadut mittaustulokset verrattuina muiden menetelmien tuloksiin kertovat, että kaikki menetelmät antavat toisiaan vastaavia tuloksia, mutta toisaalta kiusahäikäisyn subjektiivisuuden takia tuloksia ei voi pitää varmuudella oikeina, kuten taulukko 11 osoittaa. On kuitenkin huomattava, että työympäristökyselyssä tilastollinen otos (etenkin opintotoimistossa) oli liian pieni, jotta sen tuloksista voitaisiin tehdä luotettavia päätelmiä.

UGR-menetelmän etu on tulosten soveltuvuudessa erilaisiin työtilanteisiin, mutta itse UGR-arvot ovat melko epähavainnollisia ja vaativat kokemusta tai taulukoita, jotta niitä voidaan tulkita oikein.

1.8 Yhteenveto kiusahäikäisyn arviointimenetelmistä

Kaikissa käsitellyissä häikäisynarvostelumenetelmissä käytetään häikäisyn laskentaan samoja mittaussuureita, eli häikäisylähteen luminanssia, näkökentän keskimääräistä luminanssia, häikäisylähteen avaruuskulmaa ja häikäisylähteen sijaintia. Näiden suureiden mittaaminen on nykyisillä mittalaitteilla aikaavievää ja hankalaa, joten häikäisymittarin kehittäminen olisi hyödyllistä ainakin häikäisyä tutkivien ihmisten kannalta. Tällainen mittalaite helpottaisi ja nopeuttaisi myös eri häikäisynarvostelujärjestelmien vertailua sekä luotettavuuden että keskinäisten eroavuuksien kannalta. Tällä hetkellä sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratoriossa on käytössä CapCalc-luminanssivideofotometri, jolla voidaan mitata määriteltujen alueiden keskimääräisiä luminansseja, mutta laitteen muut ominaisuudet eivät riitä perusteellisiin häikäisymittauksiin.

VCP-menetelmä arvioi häikäisyä prosenttilukuna, joka kertoo valaistukseen tyytyväisten osuuden tai vaihtoehtoisesti todennäköisyyden, jolla satunnaisesti valittu henkilö on tyytyväinen valaistukseen. BGI ja UGR -menetelmät antavat häikäisyyden häikäisyindekseinä, joille on olemassa taulukoituja suosituksia erilaisten työskentelytilanteiden mukaan. Toistaiseksi CIE ei ole esittänyt UGR:ää varten omia suosituksia, joten kaikki arviot perustuvat BGI-suosituksiin. CIE:llä lienee tarkoitus korvata BGI-menetelmä UGR:llä tulevaisuudessa, joten UGR-suosituksia on odotettavissa.

VCP-, UGR- ja luminanssikäyrämenetelmien käytettävyyttä mittaus- ja analysointitilanteissa on vertailtu taulukossa 12.

Taulukko 12. Häikäisynarvostelujärjestelmien käytettävyyden vertailu.

	VCP	UGR	Luminanssi- käyrät
Suureet	häikäisylähteen luminanssi, ava- ruuskulma, si- jainti; näköken- tän keskim. lu- minanssi	häikäisylähteen luminanssi, ava- ruuskulma, si- jainti; sopeutu- misluminanssi	häikäisylähteen luminanssi, ava- ruuskulma, si- jainti; sopeutu- misluminanssi
Perusyhtälön muoto	$0,5 \cdot L_s \omega' / L_b^{0,44} p$	$0,25 \cdot L_s^2 \omega / L_b p^2$	$L_s \omega^{0,5} / L_b^{0,6} p$
Soveltuvuus käsin- laskentaan	huono	melko hyvä	hyvä
Soveltuvuus tietokone- laskentaan	hyvä	hyvä	huono
Mittalaitteen vaatimukset	keskim. lumi- nanssi, etäi- syydet	keskim. lumi- nanssi, etäi- syydet	pisteen lumi- nanssi, valais- tusvoimakkuus
Rajoitukset	ei ole	häikäisylähteen koko	taulukot ja käyrät

VCP- ja UGR-menetelmien antamien tulosten vertailu on esitetty taulukossa 13. Taulukon tulokset osoittavat, että ainakin näin pienellä otoksella kaikki saman tilan häikäisymarvot vastaavat hyvin toisiaan ja muutos tapahtuu aina samaan suuntaan, kun siirrytään tilasta toiseen (kun VCP pienenee, niin UGR ja BGI kasvavat ja päinvastoin). On huomattava, että VCP-menetelmä ei ole tarkoitettu paljaille loistelum-
puille, eli vaaditaan, että valaisimessa on häikäisyä rajoittava ritilä. Tämän vuoksi huoneen I343 VCP-mittaustulokset eivät ole luotettavia.

Taulukko 13. Mitattujen häikäisymarvojen vertailu.

Tila	VCP [%]	BGI	UGR
Huone I344A	93,8	8,3	9,4
Huone I343	47,6	16,9	18,2
Kirjaamo K005	80,1	11,2	12,2
Opintotoimisto Y223 suunta 1	68,0	13,9	14,5
Opintotoimisto Y223 suunta 3	81,8	12,9	13,8
Näkövammaisten keskusliitto	86,2	11,1	11,9

VCP-menetelmä soveltuu parhaiten valaistuksen yleisen miellyttävyyden arvioimiseen. UGR-menetelmää puolestaan voidaan käyttää arvioimaan valaistuksen soveltuvuutta tarkemmin määriteltyn työtehtävään. Haittapuolena molemmissa menetelmissä on mittausten hankaluuden lisäksi se, ettei ikkunoiden ja päivänvalon vaikutusta voi alkuperäisten määritelmien mukaan ottaa huomioon. Häikäisylähteen liian suuri tai liian pieni koko huonontavat etenkin UGR-menetelmän luotettavuutta. Kokoa rajoittavat myös käytettävän mittalaitteen ominaisuudet.

Koska kumpikaan käsitellyistä menetelmistä ei ole yksiselitteisesti parempi, on toistaiseksi mielekäästä arvioida toistaiseksi häikäisyä sekä VCP:n että UGR:n avulla, jolloin on mahdollista saada parempi kokonaiskuva häikäisystä kuin pelkästään käyttämällä vain toista menetelmää.

Jos halutaan valita vain yksi menetelmä, niin UGR-menetelmän käyttöön siirtymistä puoltaa se, että menetelmä on johdettu BGI-menetelmästä ja vastaa varsin pitkälle Suomessa käytettävää NB-menetelmää. Tällöin siirtyminen käyttämään UGR-menetelmää olisi vaivatonta ja yhteensopivuus vanhojen mittaustulosten kanssa säilyisi ja vanhat BK-taulukot olisivat yhä käyttökelpoisia.

2 Estohäikäisy

Estohäikäisy on häikäisyä, joka heikentää näkökykyä mutta ei välttämättä aiheuta epämiellyttävyyden tunnetta (SFS IEC 50, määritelmä 845-02-57).

Silmään saapuva valo hajoaa silmän eri kerroksissa aiheuttaen valoharson verkkokalvolle, mikä pienentää näkökohteen ja taustan välistä kontrastia verkkokalvolla. Tätä ilmiötä kutsutaan estohäikäisyksi, ja sitä aiheuttaa kirkas näkökentässä oleva valonlähde. Harso on perinteisesti määritetty luminanssin L_{seq} avulla, joka vastaa hajavalon vaikutusta. Tämä on esitetty yhtälössä 23:

$$C_{seq} = \frac{|(L_t + L_{seq}) - (L_b + L_{seq})|}{L_b + L_{seq}} = \frac{|L_t - L_b|}{L_b + L_{seq}} \quad (23)$$

jossa C_{seq} = näkökohteen kontrasti, jossa on otettu huomioon harsoluminanssin vaikutus

L_{seq} = ekvivalentti harsoluminanssi [cd/m^2]

L_t = näkökohteen luminanssi [cd/m^2]

L_b = taustan luminanssi [cd/m^2].

Toinen tapa ottaa huomioon harsoluminanssin vaikutus on määrittää estohäikäisyn aste (D), jonka suositusarvoina tievalaistuksessa pidetään $D = 0,1-0,5 / 35/$.

$$D = \frac{L_{seq}}{L_b + L_{seq}} \quad (24)$$

jossa D = estohäikäisyn aste

L_{seq} = ekvivalentti harsoluminanssi [cd/m^2]

L_b = taustan luminanssi [cd/m^2].

Useat tutkijat ovat käyttäneet sekä objektiivisia että psykofysikaalisia menetelmiä estohäikäisyn analysointiin ja mallintamiseen. Erään varhaisimmista tutkimuksista näön toiminnasta häikäisytalanteessa teki Helmholtz vuonna 1852 /36/. Vuosikokouksen vaihteessa Depène raportoi tutkimuksistaan, jotka käsittelivät näöntarkkuutta ja osoittivat, että häikäisyn vaikutus pieneni, kun häikäisylähdettä siirrettiin sivumalle näkökentän keskeltä /37/. Holladayn tutkimukset vuodesta 1927 lähtien ovat merkittäviä siksi, että niissä on ensimmäisenä systemaattisesti tutkittu luminanssieroituksen vaikuttavia parametreja /38/. Holladay kehitti periaatteen, jossa korvattiin häikäisylähteen vaikutus yhtenäisellä taustaluminanssilla, sekä loi käsitteen, jota nykyisin nimitetään ekvivalentiksi harsoluminanssiksi (L_{seq}).

Holladay esitti harsoluminanssin ja geometrinen ja fotometrinen suureiden välisen suhteen olevan muotoa

$$L_{seq} = k \sum_{i=1}^n \frac{E_{gl_i}}{\theta_i^2} \quad (25)$$

jossa L_{seq} = ekvivalentti harsoluminanssi [cd/m^2]

$k = 9,2$ (20 – 30 vuotiaalle)

E_{gl} = häikäisylähteen tuottama suora valaistusvoimakkuus silmän pystysuoralle tasolle [lx]

θ = näkökohteen ja häikäisylähteen keskipisteen välinen kulma, jonka kärki on silmässä ($1,5^\circ < \theta < 30^\circ$)

n = häikäisylähteiden lukumäärä.

Stiles vahvisti vuonna 1929 Holladayn tulokset periaatteellisesti, mutta esitti pienempää eksponenttia kulmalle θ /39/. Lisäksi hän esitti, että näön heikkeneminen häikäisyn vaikutuksesta johtuisi valon hajoamisesta silmässä, eikä optisessa hermossa tapahtuvasta hermoratojen viestien sotkeutumisesta toisiinsa, kuten Holladay oli esittänyt. Rayleighin hajontaan perustuneet teoreettiset laskelmat eivät kuitenkaan vastanneet täysin havaittua kaukaisen häikäisylähteen vaikutusta. Rayleighin hajontaan vaikuttaa voimakkaasti valon aallonpituus, mitä ei ole myö-

hemmissäkään tutkimuksissa ole havaittu /40/. Tarkempi tieto valon käyttäytymisestä silmässä osoittaa, että hajavalon osuus on suurempi kuin Stiles oletti /41/.

Teoreettisesti määritetyn ja mitatun hajavalon heikkoa vastaavuutta selittää se, että silmän valoa läpäisevät osat (sarveiskalvo, linssi ja lasiainen) ovat mittasuhteiltaan suuria verrattuna valon aallonpituuteen ja siksi Rayleighin hajontaan perustuvat johtopäätökset eivät päde. Tämä selittää myös hajonnan olemattoman riippuvuuden valon aallonpituudesta.

Viimeisimmät tämän alan tutkimukset /42, 43, 44/ ovat myös osoittaneet, että häikäisykulman (θ) eksponentti kasvaa, kun häikäisykulma pienenee. Lisäksi kertoimen k arvon on jo jonkin aikaa katsottu riippuvan iästä. Useat tutkijat ovat ehdottaneet erilaisia yhtälöitä k :lle, mutta ne eroavat toisistaan merkittävästi /45, 46, 47, 48/. Blackwell /47/ esittää myös, että taustaluminanssilla olisi vaikutusta.

2.1 Häikäisykulman eksponentti

Taulukko 14 osoittaa, että useimmat siinä esitetyt tutkijat ovat yhtä mieltä siitä, että ekvivalentti harsoluminanssi muuttuu käänteisesti häikäisykulman toisen potenssin kanssa. Adrian teki kokeensa varsin matalilla luminanssitasoilla sai eksponentin θ arvoksi hieman alle 2 /49/. Fryn mukaan pienillä kulmilla eksponentin pitää pienetä ja L_{seq} :n lopulta lähestyä arvoa $1/\theta$ /41/. Toisaalta Vosin ja Hartmannin toisistaan riippumattomat kokeet osoittivat eksponentin kasvavan pienenevillä kulman θ arvoilla. Adrianin viimeisin tutkimus /50/ esittää, että eksponentti kasvaa, kun näkökulma on pienempi kuin 2° .

Jotta tämä eksponentin kasvu olisi voitu varmistaa, Hartmann ehdotti, että tutkittaisiin objektiivisin mittauksin hajavalon käyttäytymistä silmän eri rakenneosissa. Wehmeyer /51/ suunnitteli laitteen, jolla oli mahdollista mitata hajavaloa kulmassa, jonka alaraja oli 12 kulmaminuuttia ($0,2^\circ$). Hän käytti viittä nuoren lehmän silmää mitatakseen silmän rakenneosista aiheutuvaa suhteellista hajavalon tuottamaa valaistusvoimakkuutta. Sarveiskulma, linssi, lasiainen ja kammiovesi erotettiin ja niitä valaistiin laserilla eri kulmista ja suhteellinen hajavalon osuus kussakin osassa mitattiin. Hajavalon kokonaismäärä on siten rakenneosien hajavalon summa.

Taulukko 14. Joidenkin tutkijoiden esittämiä ekvivalentin harsoluminanssin yhtälöitä. α = valon spektristä riippuva vakio, L_s = häikäisylähteen luminanssi, L_A = sopeutumisluminanssi.

Tutkija	Menetelmä	Yhtälö (L_{seq}/E_{gl})	Rajat
Holladay	Psykofyysinen	$9,2/\theta^2$	$4^\circ < \theta < 16^\circ$
Stiles/Crawford	Psykofyysinen	$10,1/\theta^2$	$1^\circ < \theta < 10^\circ$
Fry	Teoreettinen	$10/(\theta(\theta+1,5))$	
Adrian	Psykofyysinen	$9,2/\theta^{1,72}$	$4^\circ < \theta < 30^\circ$
Hartmann	Psykofyysinen	$\alpha/\theta^{3,4}$	$\theta < 100^\circ$
Meskov	Psykofyysinen	$\alpha(\log L_s - 8,54)/(10^{-3} L_A \theta^{-2})$	

Jos oletetaan, että ekvivalentti harsoluminanssi on muotoa

$$L_{seq}(\theta) = k \cdot E_{gl} / \theta^m \quad (26)$$

niin parametrille m saadaan Wehmeyerin tulosten perusteella seuraava yhtälöpari:

$$m(\theta) = 2,3 - 0,7 \cdot \log \theta \quad 0,2^\circ \leq \theta < 2^\circ \quad (27)$$

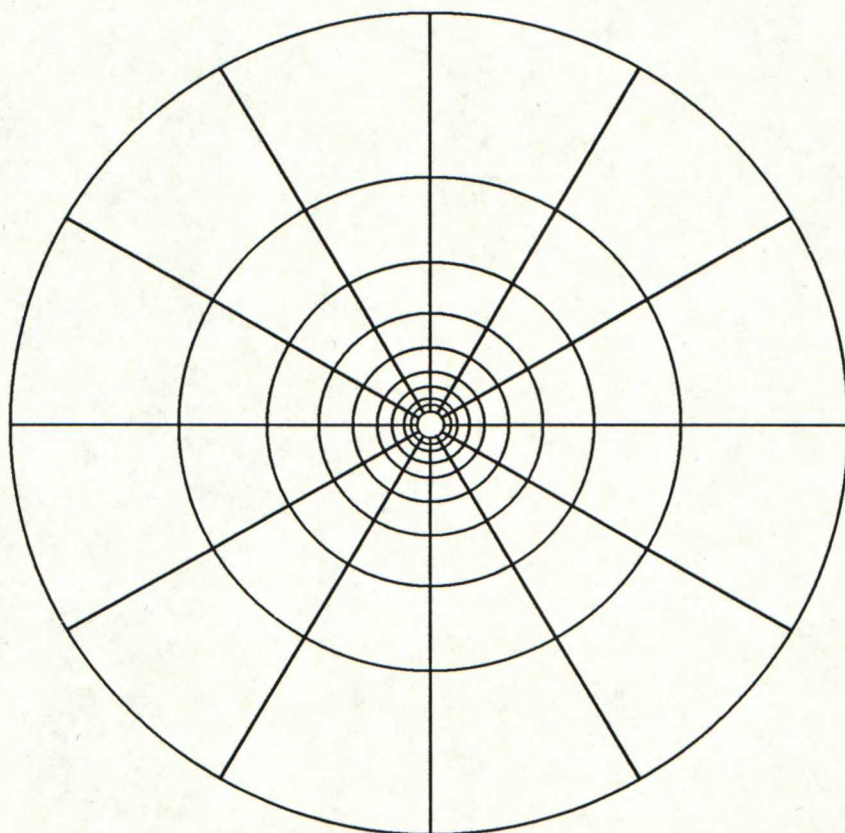
$$m(\theta) = 2 \quad \theta \geq 2^\circ \quad (28)$$

Käyttämällä yhtälöä 27 saadaan $n(2^\circ) \approx 2$ ja yhtälön 26 kulmakerroin on tässä pisteessä noin -2. Tämä sallii funktion L_{seq} määrittämisen paloittain, eikä muutos pisteessä $\theta = 2^\circ$ ole kovin jyrkkä. Tällä tavoin Holladayn esittämää alkuperäistä yhtälöä voidaan edelleen käyttää, kun korjataan vain eksponentti n yhtälön 27 muotoon, jolloin se pätee myös pienille kulmille θ .

2.1.1 Adrianin diagrammi

Ekvivalentti harsoluminanssi on mahdollista määrittää myös luminanssien perusteella ns. Adrianin diagrammista, joka muodostuu kymmenestä sisäkkäisestä samankeskisestä ympyrästä, jotka on jaettu 12 sektoriin (kuva 14). Diagrammi ottaa

huomioon sekä häikäisylähteiden että taustan vaikutuksen diagrammin peittämällä alueella.



Kuva 14. Adrianin diagrammi [53/].

Taulukossa 15 on esitetty ympyröiden säteet asteina.

Taulukko 15. Adrianin diagrammin ympyröiden säteet.

Ympyrän numero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ympyrän säde [°]	1,0	1,5	2,0	2,9	4,0	5,8	8,3	12,0	18,0	28,4

Diagrammissa on 108 aluetta, joiden keskimääräiset luminanssit mitataan. Sisimmän ympyrän luminanssia ei siis käytetä. Ekvivalentti harsoluminanssi saadaan näiden luminanssien summasta kertomalla se luvulla $5,131 \cdot 10^{-4}$ [53/]. On huomattava, että tämä menetelmä pätee vain henkilöille, joiden ikä on 20–30 vuotta.

2.2 Iän vaikutus

Iän mukana silmässä tapahtuvat kemialliset muutokset muuttavat linssin ja sarveiskalvon optista puhtautta ja läpäisyä. Tämä lisää verkkokalvolle tulevan hajavalon määrää ja täten myös pienentää verkkokalvolle syntyvän näkökohteen kuvan kontrastia.

Vuonna 1965 Fisher ja Christie esittivät, että Holladay-Stilesin yhtälön (yhtälö 25) kerroin k voisi olla iän funktio. Adrian määrittä 2095 koehenkilön, joiden iät olivat välillä 20 – 80 vuotta, mittaustuloksista ($\theta = 3^\circ$, $L_b = 0,1 \text{ cd/m}^2$, $E_{gl} = 0,35 \text{ lx}$) funktion kertoimelle k , joka osoitti riippuvuutta iästä /52/:

$$k_{\text{rel}} = 1 + (0,0248 \cdot A - 0,621)^2 \quad (29)$$

jossa $k_{\text{rel}} = k/9,2$

$A = \text{ikä [vuotta]}, \text{ pätee } 25 - 80 \text{ vuotiaille.}$

Ijspeert /48/ mittasi psykofyysisillä menetelmillä hajavaloa koehenkilöiden silmissä. 129 eri-ikäisen vapaaehtoisen tuloksista huomattiin, että ikä vaikuttaa ekvivalenttiin harsoluminanssiin yhtälön 30 mukaisesti.

$$k_{\text{rel}} = 1 + (A/68,7)^4 \quad (30)$$

Adrian muotoili uuden yhtälön mittaustuloksista, joita oli käytetty yhtälön 29 määrittämiseksi, sovittamalla ne yhtälön 30 mukaisesti:

$$k = 9,05 \cdot [1 + (A/66,4)^4] \quad (31)$$

Yhtälöt 30 ja 31 eivät eroa merkittävästi toisistaan. Nyt kuitenkin pitää k_{rel} kertoa kertoimella 9,05, jotta saadaan $k_{25} = 9,2$. Tässä k_{25} = kertoimen k arvo 25-vuotiaalle.

2.3 Taustaluminanssin vaikutus

On osoitettu, että näkökentän voidaan katsoa muodostuneen valonlähteistä, jotka aiheuttavat hajavaloa silmässä /54, 55/. Täten taustaluminanssi lisää ekvivalentin harsoluminanssin määrää omalta osaltaan seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$L_{seq,t} = 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot k \cdot L_b \cdot \ln \varphi \quad (32)$$

jossa k = yhtälön 31 mukainen kerroin

L_b = taustan keskimääräinen luminanssi [cd/m^2]

φ = näkökentän koko $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$

φ_1 = näkökentän keskialueen peittävä kulma (2° , jolloin $\varphi_1 = 1^\circ$) [$^\circ$]

φ_2 = näkökentän keskipisteen ja yläreunan välinen kulma [$^\circ$].

Nyt voidaan määrittää L_{seq} niin, että otetaan huomioon myös taustaluminanssi:

$$L_{seq} = L_{seq,h} + L_{seq,t} \quad (33)$$

jossa $L_{seq,h}$ = häikäisylähteiden aiheuttama harsoluminanssi [cd/m^2]

$L_{seq,t}$ = taustan aiheuttama harsoluminanssi [cd/m^2].

Edelleen yhtälöiden 31 ja 32 perusteella saadaan:

$$L_{seq} = k \cdot [(E_{gl}/\theta^m) + 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot L_b \cdot \ln \varphi] \quad (34)$$

jossa $m = 2,3 - 0,7 \log \theta$ kun $0,2^\circ \leq \theta < 2^\circ$

$m = 2$ kun $\theta \geq 2^\circ$.

Yhteenvetona voidaan todeta, että taustaluminanssilla on pieni vaikutus vain silloin, kun L_{seq} pienentää näkökohteen kontrastia huomattavasti. Häikäisyvaikutus on erittäin pieni silloin, kun $L_b > L_{seq}$, esimerkiksi vastaantulevien autojen valot päivääkaan.

2.4 Estohäikäisymittaukset toimistotiloissa

Estohäikäisymittaukset tehtiin kiusahäikäisymittausten yhteydessä samoissa olosuhteissa. Tilat, mittausmenetelmät ja mittalaitteet sekä pohjapiirrokset ja yleiset mittaustulokset on esitetty liitteissä 3 ja 4. Estohäikäisymittaustulokset on esitetty liitteessä 6.

Taulukossa 16 on esitetty estohäikäisymittaustulokset samoissa tiloissa, joissa tehtiin kiusahäikäisymittaukset. Harsoluminanssi on mitattu CapCalc-mittarin ja Adrianin diagrammin avulla, kun katsotaan pöydällä olevaa tavallisella valkoisella kopiopaperilla olevaa tekstiä, jonka kontrasti on 0,93. Mittauksissa on käytetty pöydällä kahta vierekkäistä paperia siten, että ne peittävät koko Adrianin digrammin alueen. Mittauskulma oli 65° työntekijän silmien korkeudella olevasta vaakatasosta alaspäin. Kontrastinalenema oli kaikissa tapauksissa lähes sama, keskimäärin noin 0,04 yksikköä (4 prosenttiyksikköä). Estohäikäisyn aste D oli kaikissa tiloissa 0,05, joka täyttää suositukset reilusti.

Taulukko 16. Mittaustilojen estohäikäisyarvot katsottaessa työpöydällä normaalilla kopiopaperilla olevaa tekstiä, jonka kontrasti on 0,93. Ekvivalentin harsoluminanssin määrittämiseen on käytetty Adrianin diagrammia (kuva 14). L_b = keskimääräinen taustaluminanssi, L_t = kohteen luminanssi, L_{seq} = ekvivalentti harsoluminanssi, C_{seq} = kontrasti, jossa on otettu huomioon L_{seq} :n vaikutus, D = estohäikäisyn aste.

Tila	L_b [cd/m ²]	L_t [cd/m ²]	L_{seq} [cd/m ²]	C_{seq}	D
Huone I344A	112,7	7,9	6,1	0,88	0,05
Huone I343	120,1	8,4	6,5	0,88	0,05
Kirjaamo K005	184,7	11,1	10,2	0,89	0,05
Opintotoimisto Y223 suunta 1	226,4	13,6	12,2	0,89	0,05
Opintotoimisto Y223 suunta 2	253,3	12,7	13,7	0,90	0,05
Näkövammaisten keskusliitto	65,9	4,6	3,6	0,88	0,05

Osassa huoneista oli mahdollisuus käyttää VTT:n luminanssimittaria (Spectra Pritchard Photometer 1970-PR), johon oli liitetty häikäisylinssi. Tällä yhdistelmällä voitiin mitata ekvivalentti harsoluminanssi yhtälön 35 mukaan:

$$L_{seq} = \frac{10\pi E \cos \theta}{\theta (1,5 + \theta)} \quad (35)$$

jossa L_{seq} = ekvivalentti harsoluminanssi [fL]

E = valaistusvoimakkuus [fc]

θ = näkökentän keskipisteen ja häikäisylähteen välinen kulma [°].

Taulukossa 17 on esitetty häikäisylinssin ja Adrianin diagrammin avulla saatujen harsoluminanssien ja häikäisyarvojen vertailu. Tämän perusteella häikäisylinssin antamat harsoluminanssin arvot ovat keskimäärin 30% pienempiä kuin Adrianin diagrammin perusteella saadut arvot. Ero johtunee mittareiden erilaisesta mittauskulmasta ja kalibroinnista.

Taulukko 17. Vertailu Adrianin diagrammin avulla saatujen ja häikäisylinssin avulla saatujen häikäisyarvojen välillä. Mittauskohta oli molemmilla mittareilla sama. L_{seq} = ekvivalentti harsoluminanssi, C_{seq} = kontrasti, jossa on otettu huomioon L_{seq} :n vaikutus, D = estohäikäisyn aste.

Tila	L_{seq} (Adrian)	C_{seq} (Adrian)	D (Adrian)	L_{seq} (linssi)	C_{seq} (linssi)	D (linssi)
I344A	6,1	0,88	0,05	4,3	0,90	0,04
I343	6,5	0,88	0,05	3,6	0,90	0,03
Kirjaamo	10,2	0,89	0,05	8,3	0,90	0,04

2.5 Johtopäätökset

Tehtyjen mittausten perusteella on vahvistettavissa johtopäätös, että estohäikäisyllä on sisätiloissa vain vähäinen merkitys. Estohäikäisyn aste jää kaikissa tapauksissa alle suositusten alarajankin ($D = 0,1$). Näkökohteen kontrasti pienenee joitakin prosenttiyksikköjä, mutta käytännössä työntekijä ei edes havaitse näin pientä muutosta. Mittauksia tehtiin myös vaakasuoraan katsesuuntaan, jolloin kontrastia ei pystytty määrittämään. Näissäkin mittauksissa estohäikäisyn aste ja alle arvon 0,1.

Estohäikäisyn mittaaminen ei ole yhtä monimutkaista kuin kiusahäikäisyn mittaaminen, jos käytettävissä on luminanssimittari ja siihen sopiva häikäisylinssi. Adria-

nin diagrammin käyttö puolestaan vaatii pitkällisiä laskutoimituksia, mikäli ei ole käytettävissä järjestelmää, joka automaattisesti laskee ympyrän sektorien keskimääräiset luminanssit ja edelleen ekvivalentin harsoluminanssin.

Saatujen mittaustulosten perusteella ei ole syytä pitää estohäikäisyä merkittävänä tekijänä pelkästään keinovalolla valaistuissa toimistotiloissa, mutta tämän tutkimuksen ulkopuolelle jäivät tilanteet, joissa kirkasta päivänvaloa pääsee ikkunoista sisään. Niinpä ei ole perusteltua kokonaan unohtaa estohäikäisyn vaikutusta sisätiloissa ilman jatkotutkimuksia.

3 Pohdintoja kiusa- ja estohäikäisyn yhdistämisestä

Molemmat häikäisyytyypit perustuvat varsin pitkälti samoihin vaikuttaviin tekijöihin, joista tärkeimmät ovat häikäisylähteen kirkkaus, häikäisylähteen sijainti näkökentässä sekä ei-häikäisevän alueen luminanssi. Kiusahäikäisyn arvostelussa otetaan lisäksi huomioon häikäisylähteen koko.

Perustavaa laatua oleva ero syntyy siitä, että estohäikäisyn tutkimus pohjautuu silmän valoa läpäisevien osien fysikaaliseen mallintamiseen, joka hallitaan hyvin, eikä epävarmuustekijöitä juuri ole. Kiusahäikäisyn tutkimus on alusta alkaen perustunut ihmisten subjektiivisten arviointien varaan, koska aivojen toiminnan mallintaminen on ollut ja on edelleenkin alkeellisella tasolla. Tosin aivan viime aikoina on tehty tutkimuksia silmän lihastoimintojen vaikutuksista aivosähkökäyriin, kun koehenkilöä häikäistään eri tavoin.

Toinen ongelma on esto- ja kiusahäikäisyn erilaiset arviointisuureet. Estohäikäisyä arvostellaan joko suoraan ekvivalentin harsoluminanssin avulla tai häikäisyn vaikutuksella näkökohteen kontrastiin, kun taas kiusahäikäisylle on kehitetty omat häikäisyindeksit, jotka perustuvat siihen, että ne ovat sopivan suuruisia lukuja, joissa yhdestä kolmeen yksikön muutos on merkittävä. Niinpä olisi löydettävä näiden kahden lähestymistavan väliltä jokin sopiva tunnusluku kuvaamaan molempia häikäisyytyyppejä. Koska häikäisy aistitaan silmän verkkokalvolle syntyvien kirkkauserojan perusteella, tarvitaan suure, joka kertoo verkkokalvon todellisen luminanssi- tai valaistusvoimakkuusjakauman.

Koska estohäikäisy syntyy ennen verkkokalvoa (silmän linssissä) ja kiusahäikäisy taas verkkokalvon jälkeen (aivoissa), olisi kehitettävä malli, joka ottaisi huomioon silmän linssin siirtofunktion sekä aivojen siirtofunktion. Nykyisellä tietämyksellä ja mittalaitteilla on mahdollista toteuttaa järjestelmä, joka mittaa verkkokalvon luminanssijakauman ja silmän siirtofunktion, mutta aivojen tuntemus on vielä sillä tasolla, että aivojen vaikutusta tällaiseen järjestelmään ei pystytä lisäämään. Niinpä tällä hetkellä pitäisi keskittyä nimenomaan aivojen tutkimukseen ja pyrkiä saamaan riittävästi lisätietoa tältä alueelta.

4 Yhteenveto häikäisyn arviointimenetelmistä

VCP-menetelmä antaa helposti ymmärrettäviä tuloksia ja soveltuu kaikenlaisten tilojen häikäisyn arviointiin. Rajoituksena on se, että periaatteessa VCP-menetelmää ei voi käyttää, jos loistelamppu näkyy suoraan valaisimesta, eli häikäisysuojausta ei käytetä. Tietokonelaskentaan VCP-menetelmä soveltuu hyvin.

UGR-menetelmällä saadaan häikäisyindeksejä, joiden raja-arvoja voidaan asettaa eri tavalla eri työtehtäville. UGR-menetelmä on monipuolinen ja soveltuu sekä tietokonelaskentaan että taulukoiden perusteella tehtävään häikäisyn arviointiin. Etuna on myös suomalaisesta näkökulmasta katsottuna se, että UGR-menetelmä perustuu varsin pitkälti nykyisin Suomessa käytössä olevaan NB-menetelmään, jolloin sen yleiseen käyttöön ottaminen olisi helppoa. Ongelmana on se, ettei UGR:lle ole olemassa suositustaulukoita, vaan tällä hetkellä on tyydyttävä vanhempiin BGI-suosituksiin.

Luminanssikäyrämenetelmä on vanhahtava menetelmä, joka perustuu yksinomaan häikäisynrajoituskaavioihin ja valaisinten valonjakokäyriin. Menetelmän siirtäminen tietokoneelle on hankalaa, eikä varsinaisia mittalaitteita ole kehitetty. Etuna on helppo käytettävyys, jos on olemassa sopivat taulukot.

Estohäikäisyn mittausmenetelmät eivät juuri ole parantuneet ennen Adrianin diagrammin kehittämistä. Ennen sitä ainoa mahdollisuus mitata ekvivalenttia harsoluminanssia oli estohäikäisylinssin käyttäminen. Adrianin diagrammin käyttö vaatii tosin mittalaitteen, joka pystyy mittaamaan alueen keskimääräisen luminanssin. Sisätiloissa estohäikäisyllä ei ole merkitystä, mutta tilanne saattaa muuttua, kun otetaan huomioon päivänvalon vaikutus.

Kiusa- ja estohäikäisyyden yhdistäminen vaatii lisätietoja kiusahäikäisyn osalta aivojen mallintamisesta näkemisen osalta. Silmän eri osien vaikutus estohäikäisyyden tunnetaan hyvin. Ratkaisun tähän voi tuoda laajeneva aivotutkimus ja neuroverkkojen käyttö aivojen toiminnan mallintamisessa.

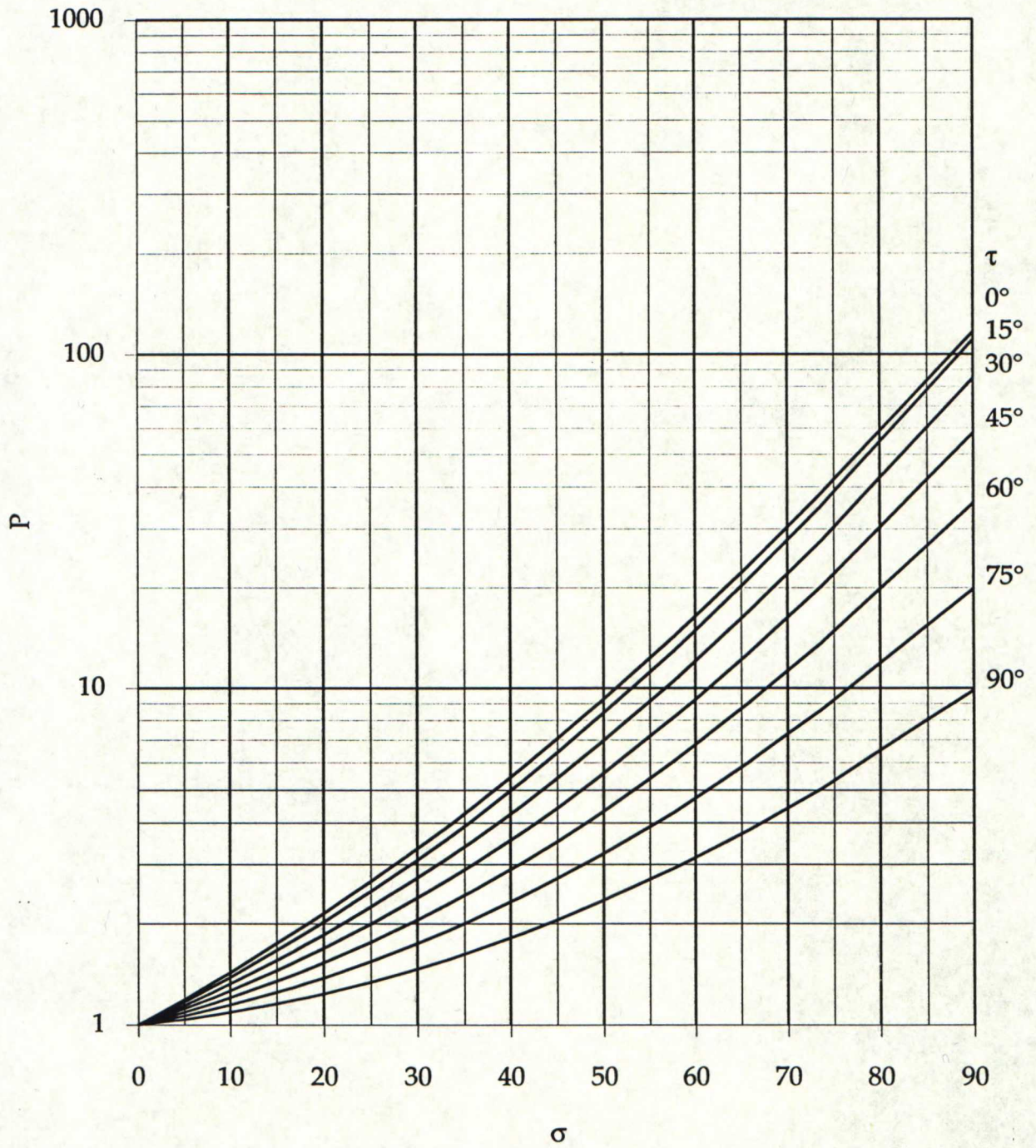
Lähdeluettelo

1. Vermeulen, D., de Boer, J. B., The permissible brightness of lamp fittings. Philips Technical Review, 1951, p. 200.
2. Luckiesh, M., Guth, S. K., Brightnesses in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD). Illuminating Engineering (1949), November, p. 650.
3. Petherbridge, P., Hopkinson, R. G., Discomfort glare and the lighting of buildings. Transactions of the IES, 1950, p. 39.
4. Committee on Recommendations of Quality and Quantity of Illumination of the IES, Outline of a standard procedure for computing visual comfort ratings for interior lighting – Report No. 2 (1972). Journal of the IES, Vol. 2, (1973), April, p. 328.
5. IES, Evaluation of discomfort glare – the glare index system for artificial lighting installations. Technical Report 10, London 1967.
6. CIBS, The calculation of glare indices. Technical Memoranda 10, London 1985.
7. IES Code for interior lighting. Illuminating Engineering Society (London), 1961.
8. Luminance study panel of the IES Technical Committee, The development of the IES Glare Index System. Transactions of the IES (London), 1962, p. 9.
9. The Chartered Institution of Building Services (London), CIBS Code for Interior Lighting. 1984.
10. Sørensen, K., A modern glare index method. CIE proceedings 21st session Venice, 1987, Vol II, p. 106.
11. de Boer, J. B., Strassenleuchtdichte und Blendungsfreiheit. Lichttechnik (1958), p. 359.
12. Arndt, W., Bodmann, H. W., Muck, E., Untersuchung über die psychologische Blendung durch mehrere Lichtquellen. CIE proceedings 14th session Brussels, 1959, p. P-59.5.

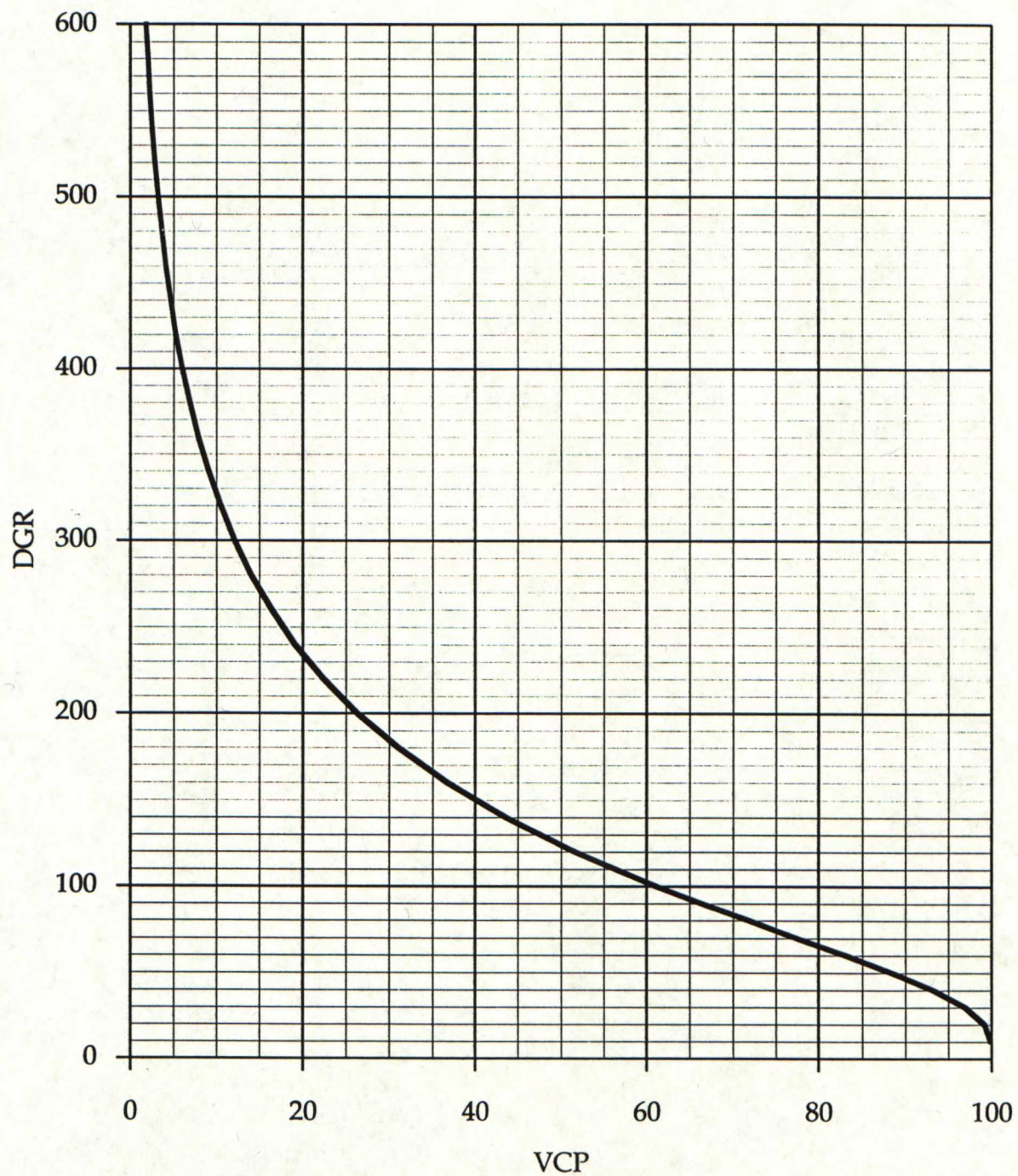
13. Bodmann, H. W., Söllner, G., Senger, E., A simple glare evaluation system. *Illuminating Engineering* (1966), p. 347.
14. Haubner, P., A method of scaling judgements. *Lighting Research and Technology* (1969), p. 182.
15. Boyce, P. R., Crisp, V. H. C., Simons, R. H., Rowlands, E., Discomfort glare sensation and prediction. *CIE proceedings 19th session Kyoto, 1979*, p. 260.
16. Fischer, D., The European glare limiting method. *Lighting Research and Technology* (1972), p. 97.
17. CIE, Guide on interior lighting. CIE Publication No. 29.2., Vienna, 1986.
18. DIN 5035, Innenraumbeleuchtung mit künstlichen Licht (Saksan teollisuusstandardi: Sisätilojen valaistus keinovalolla).
19. Manabe, H., The assessment of discomfort glare in practical lighting installations. *Economic studies* (9), Otoman Gakuin University, Osaka, Japan, 1976.
20. Fischer, D., Discomfort glare in interiors. *LRI symposium on glare, Orlando, Florida, October 1991*.
21. CIE, Discomfort glare in the interior working environment. CIE Publication No. 55, Paris, 1983.
22. Sørensen, K., Comparison of glare index definitions. Research note of the Danish Illuminating Engineering Laboratory, Lyngby, Denmark, 1987.
23. IES Lighting Handbook. Reference Volume, 1984.
24. IES Lighting Handbook. Application Volume, 1987.
25. Allphin, W., BCD appraisals of luminaire brightness in a simulated office. *Illuminating Engineering*, Vol. 56, No. 1, p. 31, January, 1961.
26. Levin, R. E., Position index in VCP calculations. *J. of the IES*, Vol. 4, p. 99, January, 1975.
27. Levin, R. E., An evaluation of VCP calculations. *J. of the IES*, Vol. 2, p. 355, July, 1973.
28. DiLaura, D. L., On the computation of Visual Comfort Probability. *J. of the IES*, Vol. 5, p. 207, July, 1976.

29. Halonen, L., Eloholma, M., Tutkimusraportti 18. TKK, Sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratorio, 1994.
30. CIE, The unified glare rating system. CIE Publication TC 3-13 (draft) 1991.
31. CIE, Discomfort glare in interior lighting. CIE TC 3-13 (6th draft), November, 1992.
32. Sørensen, K., Unified glare rating system - UGR. CIE proceedings 22nd session Melbourne, 1991, Vol. 2, pp. 157-160.
33. Sørensen, K., Standard BK tables for use in evaluation of discomfort glare in interior lighting. L&O methods, Light & Optics, Lyngby, Denmark, 1990.
34. Sørensen, K., A luminance limiting curve method – Based on a glare index formula. Research note of the Danish Illuminating Engineering Laboratory, Lyngby, Denmark, 1988.
35. Halonen, L., Lehtovaara, J., Valaistustekniikka. Otatieto Oy, 1992.
36. Helmholtz, H. v., Ann. Physik und Chemie 86 (1852), S. 1852.
37. Depène, R., Experimentelle Untersuchungen über den Einfluss seitlicher Blendung auf die zentrale Sehschärfe. Monatsbl. f. Augenheilkunde 38 (1900), pp. 289, 390.
38. Holladay, L. L., The fundamentals of glare and visibility. J. Opt. Soc. Am. 12 (1926), p. 271 & 14 (1927), p. 1.
39. Stiles, W. S., The effect of glare on the brightness difference threshold. Proc. Roy. Soc. (London), B104:322 (1928-29).
40. Ucke, C., Streulicht im Auge. Dissertation, University of Munich, 1983.
41. Fry, G. A., A re-evaluation of the scattering theory of glare. Illum. Engng. 49(2) (1954), pp. 90-102.
42. Vos, J. J., Padmos, P., Straylight, contrast sensitivity and the critical object in relation to tunnel entrance lighting. Transactions of the CIE, 20th session (1983).
43. Vos, J. J. et al, Light profiles of the foveal image of a point source. Vision Res. 16 (1976), pp. 215-219.

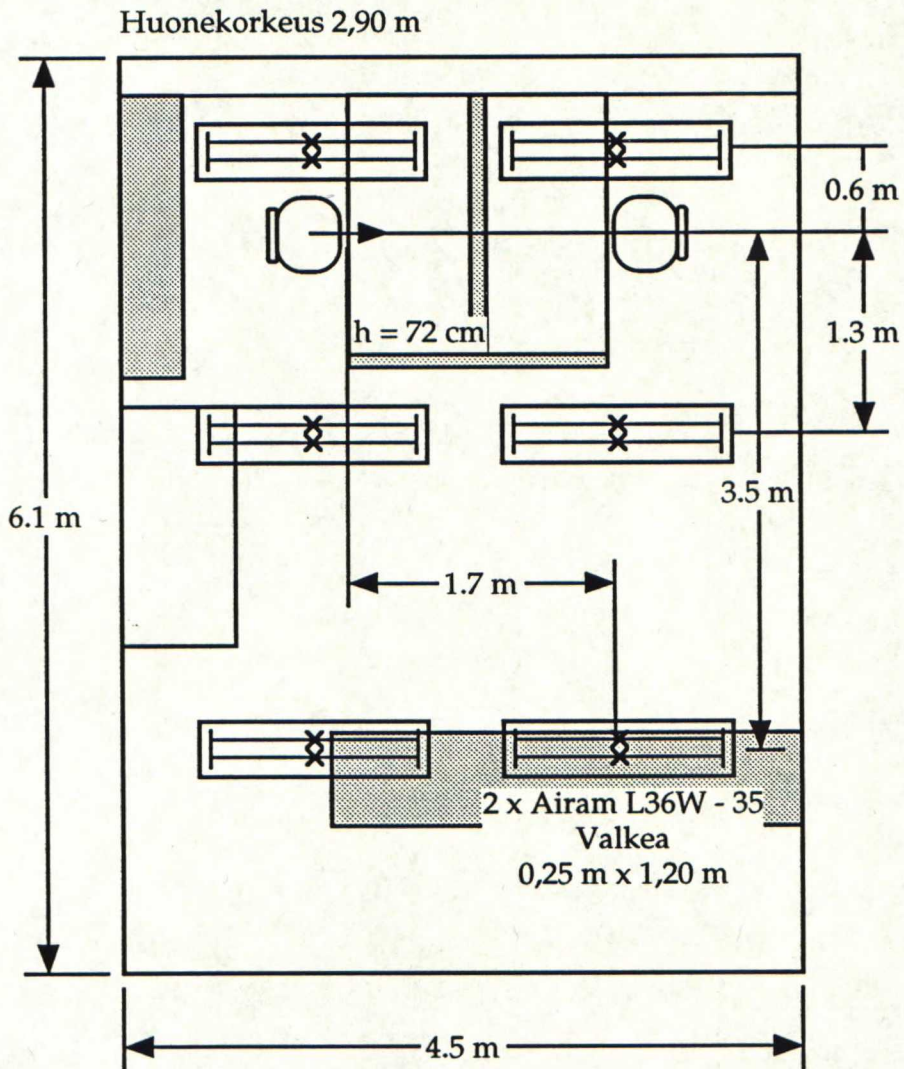
44. Hartmann, E., Moser, E. A., Das Gesetz der physiologischen und psychologischen Blendung bei sehr kleinen Blendwinkeln. *Lichttechnik* 20 (1968), p. 67A.
45. Adrian, W. K., Grundlagen der physiologischen und psychologischen Blendung und ihre numerische Darstellung. *Lichttechnik* 27 (1975), pp. 312-319.
46. Fisher, A. J., Christie, A. W., The effect of glare from street lighting lanterns on the vision of drivers of different ages. *Transactions of the IES*, 31(4) (1966), pp. 93-108; 114-120.
47. Blackwell, H. R., The influence of age in disability glare. LRI symposium on glare, Orlando, Florida, October 1991.
48. Ijspeert, J. K., et al, The intraocular straylight function in 129 healthy volunteers; dependence on angle, age and pigmentation. *Vision Res.* 30(5) (1990), pp. 699-707.
49. Adrian, W. K., Der Einfluss störender Lichter auf die extrafoveale Wahrnehmung des menschlichen Auges. *Lichttechnik* 13 (1961), pp. 450, 508, 558.
50. Adrian, W. K., Bhanji, A., Fundamentals of disability glare. A formula to describe straylight in the eye as a function of the glare angle and age. LRI symposium on glare, Orlando, Florida, October 1991.
51. Wehmeyer, K., Objektive Messungen zur physiologischen Blendung. Dissertation, University of Munich, Institute for Medical Optics, 1985.
52. Adrian, W. K., Visibility of targets: model for calculation. *Light. Res. Tech.* 21(4) (1989), pp. 181-188.
53. Adrian, W. K., Adaptation luminance when approaching a tunnel in daytime. *Light. Res. Tech.* Vol. 19 (1987), pp. 73-79.
54. Adrian, W. K., Topalova, R., Transient adaptation process: A model to predict its effects on vision. CIE proceedings 21st session Melbourne, 1991, vol. 2.
55. Adrian, W. K., Eberbach, K., On the relationship between the visual threshold and the size of the surrounding field. *Light. Res. Tech.* 1 (1969), No. 4, pp. 251-254.

Liite 1: Sijaintikertoimen muutos kulmien σ ja τ funktiona

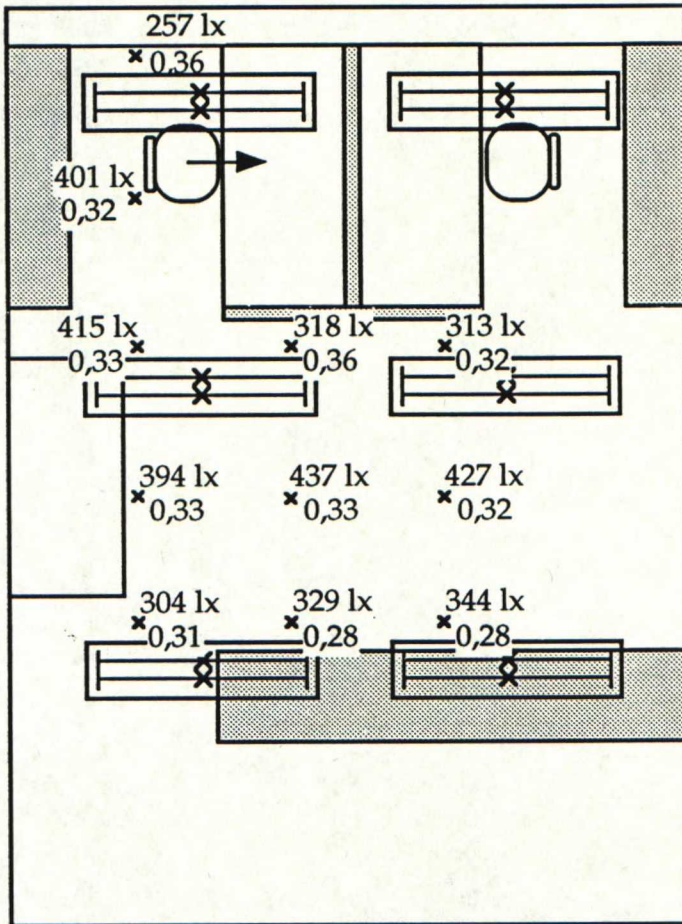
Liite 2: Kaavio VCP:n graafista määrittämistä varten



TKK/SLVT
I344A 30.11.93
Mitat



TKK/SLVT
I344A 30.11.93
Pohjapiirustus



Keskimääräinen
yleisvalaistus-
voimakkuus
358 lx
(mittauskorkeus 0,75 m,
väli 1 m)

Heijastussuhteet

-pöytä	0,34
-seinät	0,67
-katto	n. 0,7
-lattia	0,27
-sermit	0,69

TKK/SLVT

I344A 06.04.94

Työpöytä

		160 0,56	253 0,46	282 0,49	295 0,46	287 0,45	255 0,45	
139 0,37		288 0,44	326 0,45	351 0,51	364 0,48	398 0,41	400 0,41	262 0,49
257 0,38	233 0,48	326 0,47	375 0,48	415 0,50	439 0,49	456 0,40	461 0,38	307 0,49
315 0,38	325 0,41	367 0,41	391 0,43	435 0,44	466 0,43	480 0,39	472 0,38	337 0,46

Valaistusvoimakkuus [lx]

Varjonmuodostus

265 0,44	312 0,45	331 0,45	349 0,51	366 0,51	378
279	328	350	368	386	398
303 0,47	340	362 0,48	382	401 0,50	412
309	340	367	387	408	407
306 0,41	330	364 0,43	386	409 0,44	399

Koko työpöydän keskimääräinen

valaistusvoimakkuus 341 lx (väli 20 cm)

CRF-mittausalustan keskimääräinen

valaistusvoimakkuus 361 lx (väli 10 cm)

HUOM! Pöydän ja alustan mittaukset

on tehty eri päivänvalotilanteissa:

-pöytä: 503 – 505 lx (piste 1 ikkunassa)

425 – 432 lx (piste 2 ikkunassa)

-alusta: 114 – 122 lx (piste 1 ")

106 – 113 lx (piste 2 ")

Näyttö

181 lx	201 lx
170 lx	187 lx
150 lx	172 lx

Näppäimistö

332 lx	371 lx	383 lx
339 lx	370 lx	353 lx

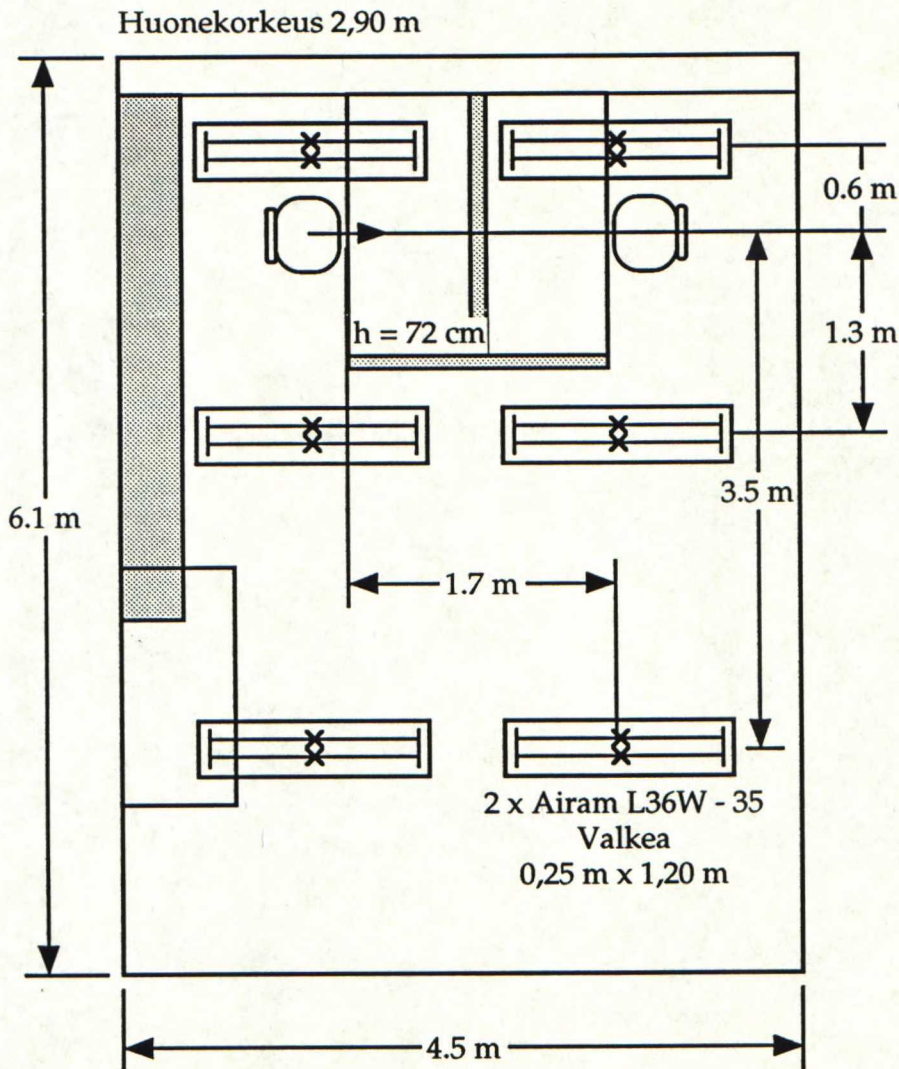
HUOM! Näytön ja näppäimistön mittaukset

on tehty päivänvalotilanteissa:

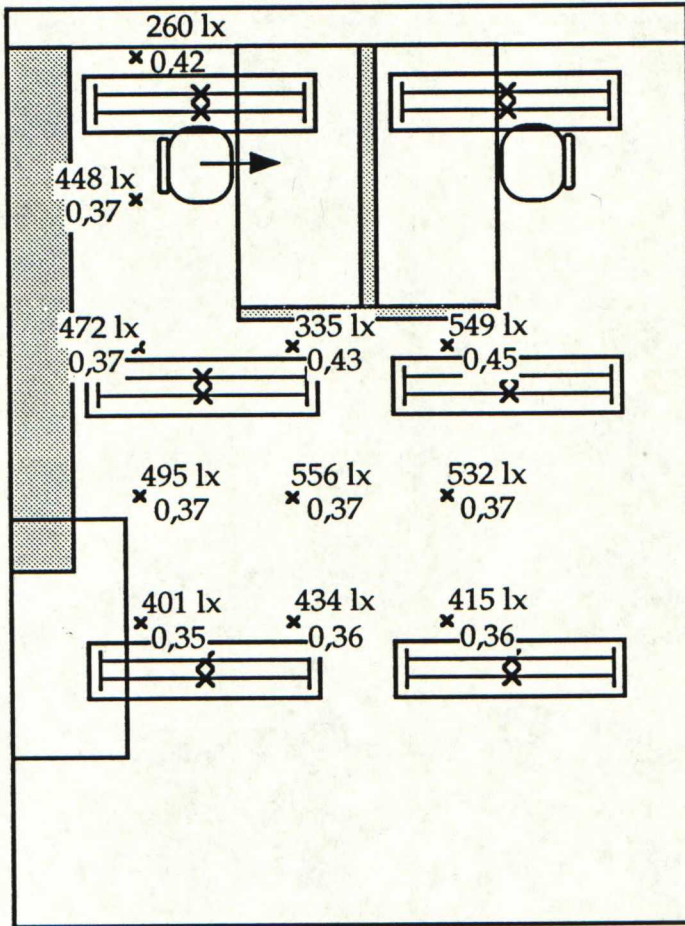
99 – 141 lx (piste 1 ikkunassa)

97 – 134 lx (piste 2 ikkunassa)

TKK/SLVT
I343 24.03.94
Mitat



TKK/SLVT
I343 24.03.94
Pohjapiirustus



Keskimääräinen
yleisvalaistus-
voimakkuus
445 lx
(mittauskorkeus 0,75 m,
väli 1 m)

Heijastussuhteet

-pöytä	0,30
-seinät	0,67
-katto	n. 0,7
-lattia	0,25
-sermi	0,63

TKK/SLVT
I343 14.04.94
Työpöytä

		225 x0,58	301 x0,52	316 x0,49	339 x0,48	363 x0,49	382 x0,49	
138 x0,43		396 x0,36	371 x0,53	411 x0,45	433 x0,45	495 x0,44	521 x0,42	400 x0,50
271 x0,41	279 x0,38	393 x0,46	431 x0,49	476 x0,48	507 x0,48	588 x0,43	618 x0,40	478 x0,49
315 x0,43	310 x0,43	390 x0,41	460 x0,45	508 x0,43	547 x0,43	633 x0,41	648 x0,40	509 x0,47

Valaistusvoimakkuus [lx]
Varjonmuodostus

319 x0,36	348 x0,36	369 x0,53	390 x0,45	413 x0,45	436 x0,45
335 x0,36	367 x0,36	390 x0,49	412 x0,49	439 x0,49	459 x0,49
348 x0,46	379 x0,46	403 x0,49	428 x0,48	456 x0,48	461 x0,48
358 x0,46	382 x0,46	407 x0,49	432 x0,49	429 x0,49	427 x0,49
354 x0,41	379 x0,41	402 x0,45	428 x0,43	415 x0,43	404 x0,43

Koko työpöydän keskimääräinen
valaistusvoimakkuus 420 lx (väli 20 cm)

CRF-mittausalustan keskimääräinen
valaistusvoimakkuus 399 lx (väli 10 cm)

HUOM! Pöydän ja alustan mittaukset
on tehty eri ulkovalaistusvoimakkuuksilla:

-pöytä: 488 – 419 lx (piste 1 ikkunassa)

400 – 390 lx (piste 2 ikkunassa)

-alusta: 79 lx (piste 1 ")

81 lx (piste 2 ")

Näyttö

220 lx x	256 lx x
204 lx x	234 lx x
150 lx x	201 lx x

Näppäimistö

x 390 lx	x 423 lx	x 472 lx
x 387 lx	x 422 lx	x 443 lx

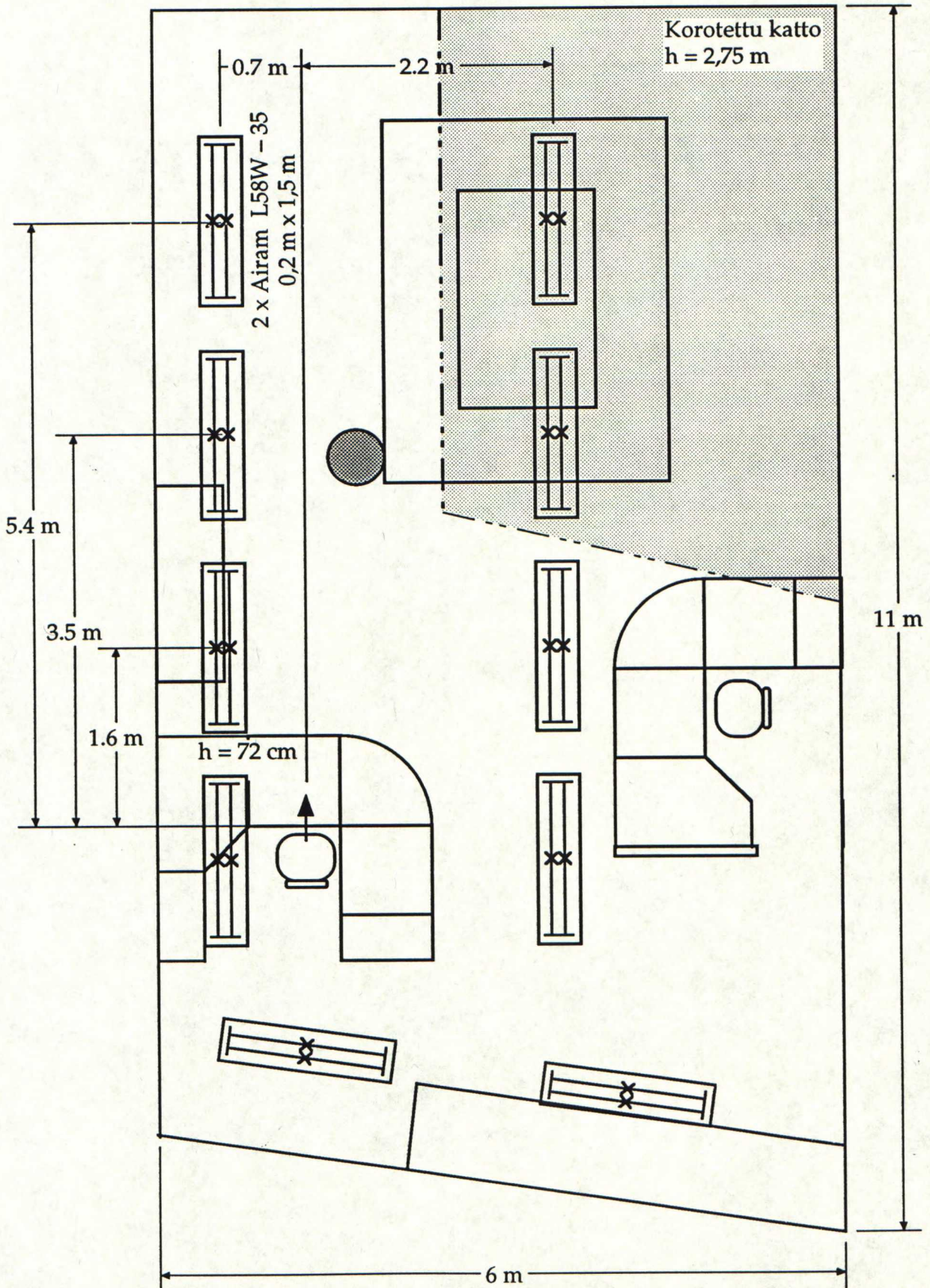
HUOM! Näytön ja näppäimistön mittaukset
on tehty ulkovalaistusvoimakkuuksilla:

85 – 82 lx (piste 1 ikkunassa)

88 – 84 lx (piste 2 ikkunassa)

TKK
Kirjaamo 21.04.94
Mitat

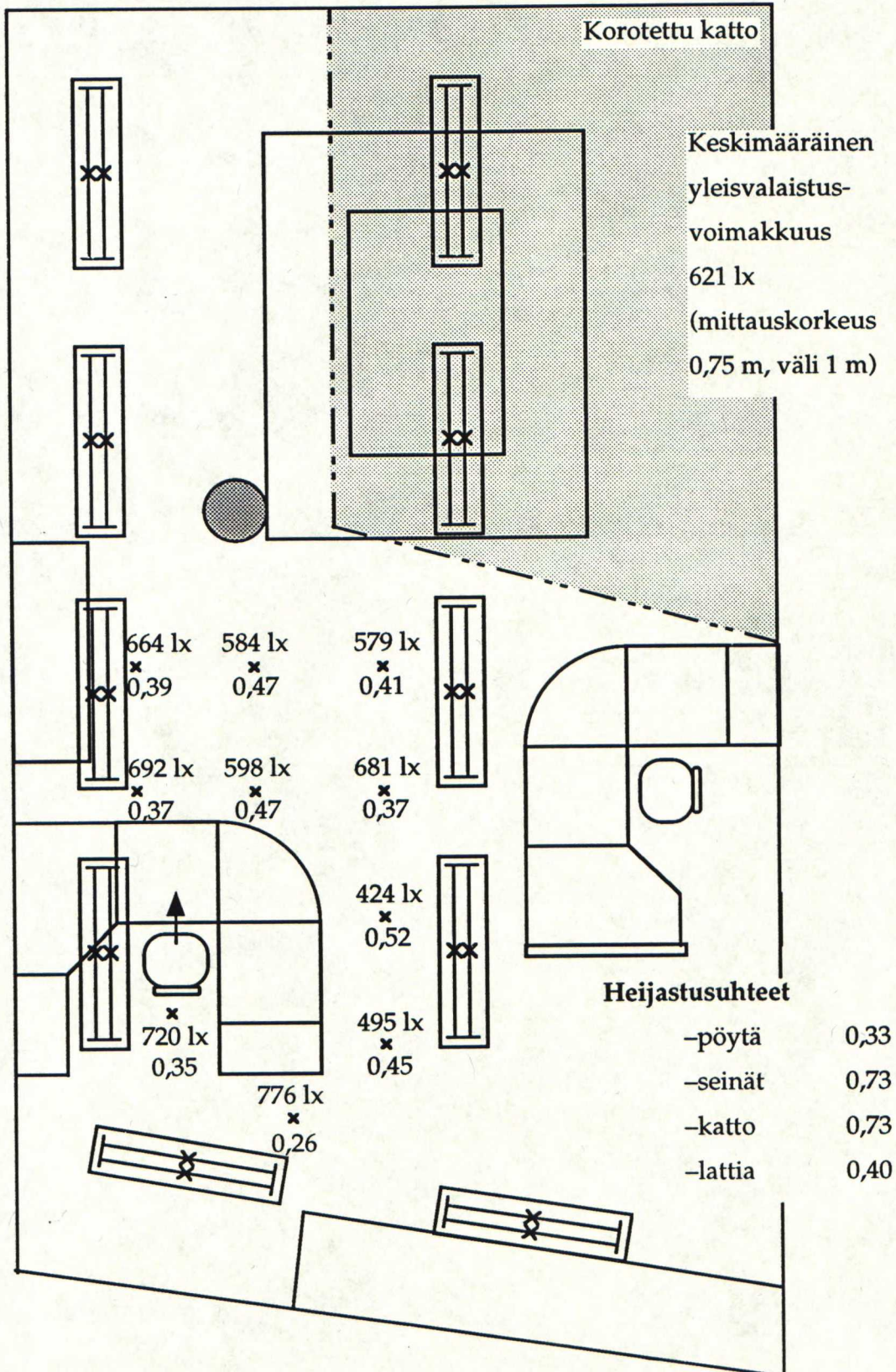
Huonekorkeus 2,45 m



TKK

Kirjaamo 21.04.94

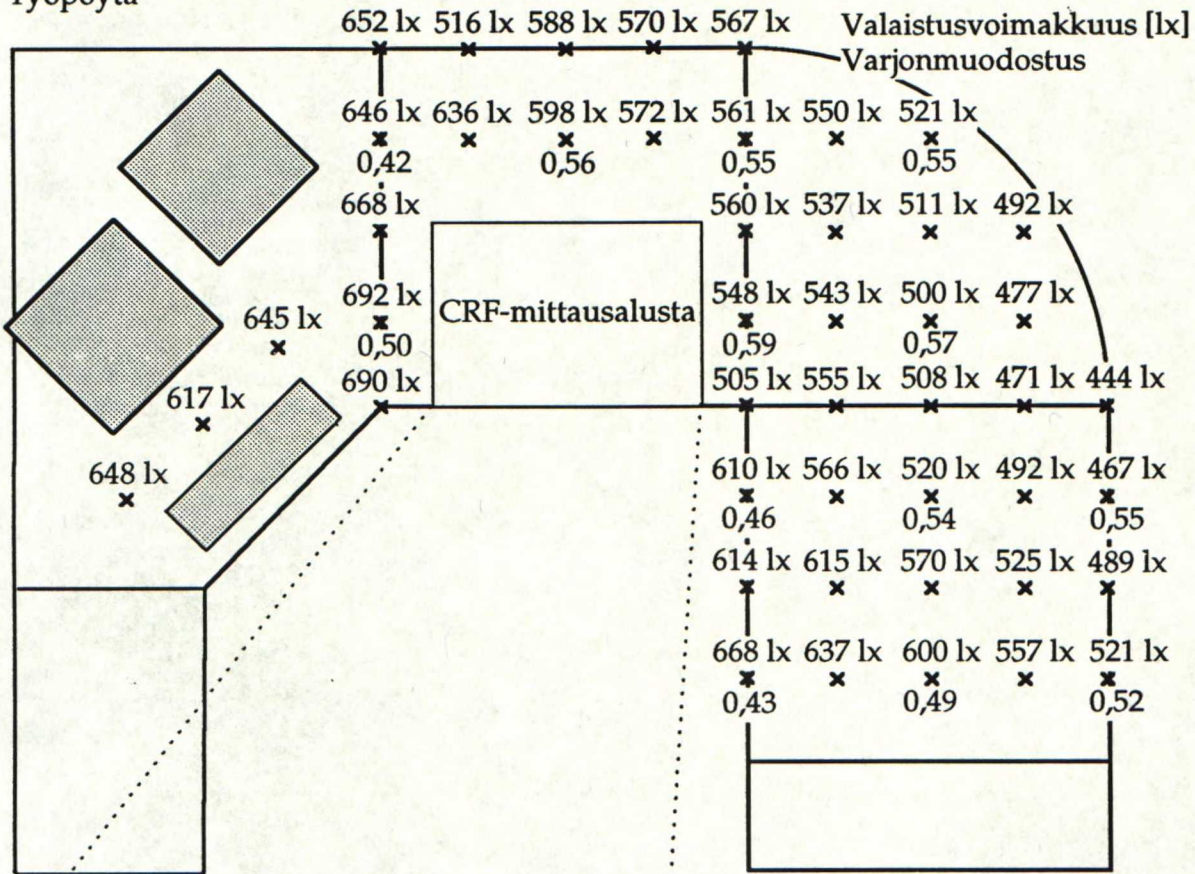
Pohjapiirustus



TKK

Kirjaamo 21.04.94

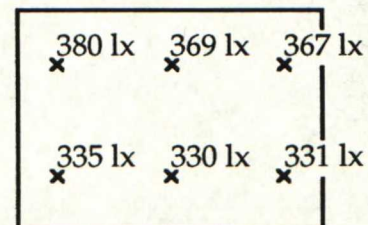
Työpöytä



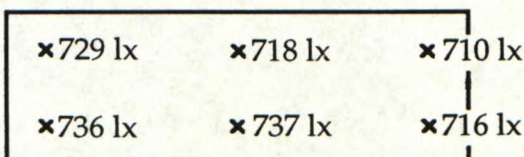
Koko työpöydän keskimääräinen
valaistusvoimakkuus 594 lx
(väli 20 cm)

CRF-mittausalustan keskim.
valaistusvoimakkuus 618 lx
(väli 10 cm)

Näyttö



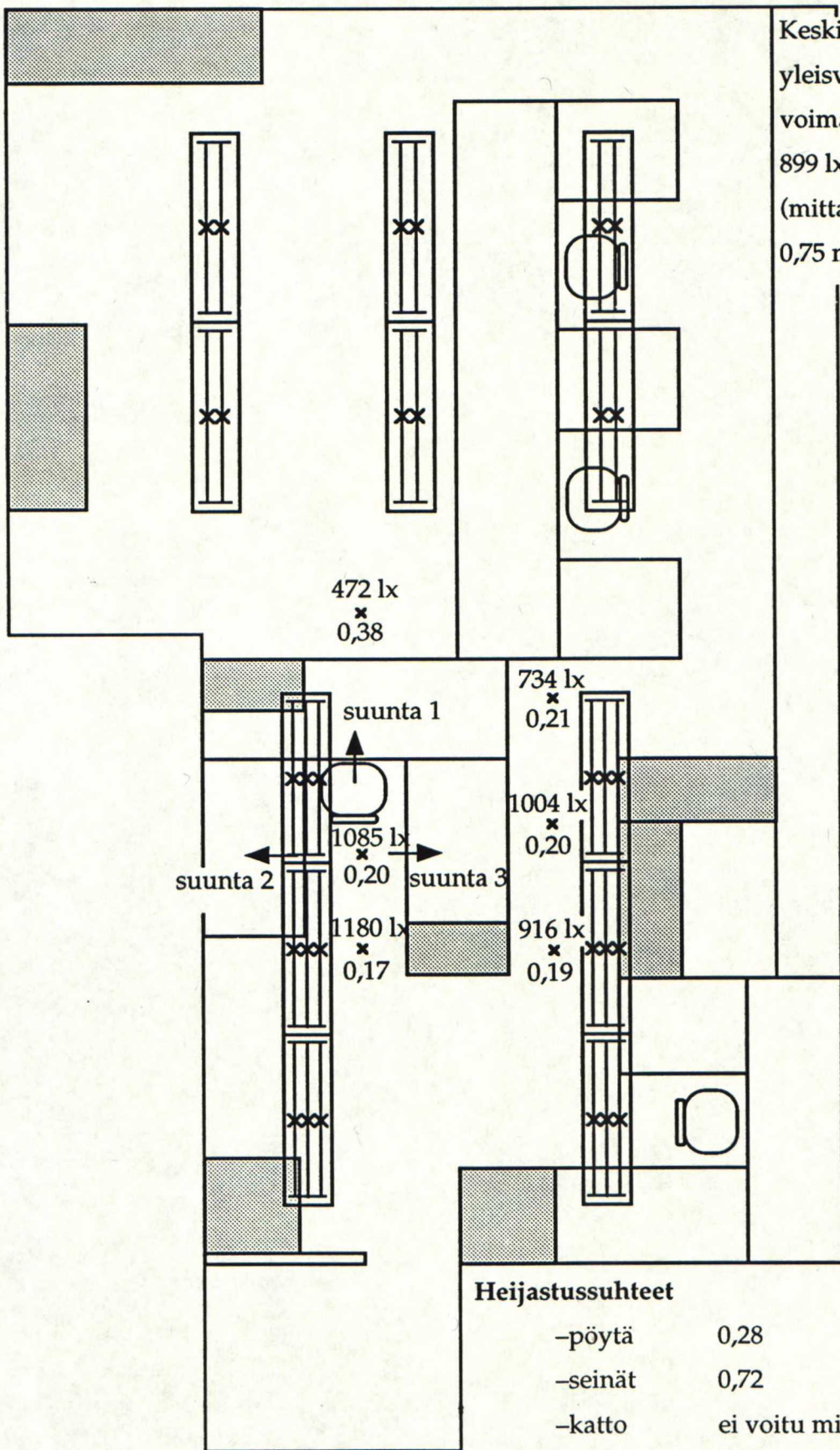
Näppäimistö



The floor plan shows a rectangular unit with a total width of 6.5 m and a total depth of 11.5 m. The layout includes:

- Living Area (Top):** Features a sofa (2 x Airam L36W - 35, 0.25 m x 1.20 m) and a coffee table. Dimensions include 5.0 m for the sofa area, 1.0 m for the coffee table, and 0.6 m for the side table.
- Dining Area (Middle):** Features a dining table (1.8 m x 1.6 m) and chairs. Dimensions include 2.2 m for the table area, 0.2 m for the chairs, and 1.8 m for the table length.
- Kitchen (Bottom Right):** Features a kitchen unit (3 x Airam L36W - 35, 0.25 m x 1.20 m) and a sink. Dimensions include 5.2 m for the unit, 4.0 m for the sink area, and 1.9 m for the unit width.
- Bathroom (Bottom Left):** Features a toilet and a shower. Dimensions include 1.5 m for the toilet area, 2.0 m for the shower area, and 3.0 m for the unit width.
- Entrance (Bottom):** Features a door and a small storage area. Dimensions include 1.5 m for the door area, 2.0 m for the storage area, and 3.0 m for the unit width.
- Other Dimensions:** The total width is 6.5 m, and the total depth is 11.5 m. The unit is divided into sections with widths of 1.5 m, 2.0 m, and 3.0 m, and depths of 5.0 m, 5.0 m, and 1.5 m.

TKK
Opintotoimisto 27.04.94
Pohjapiirustus

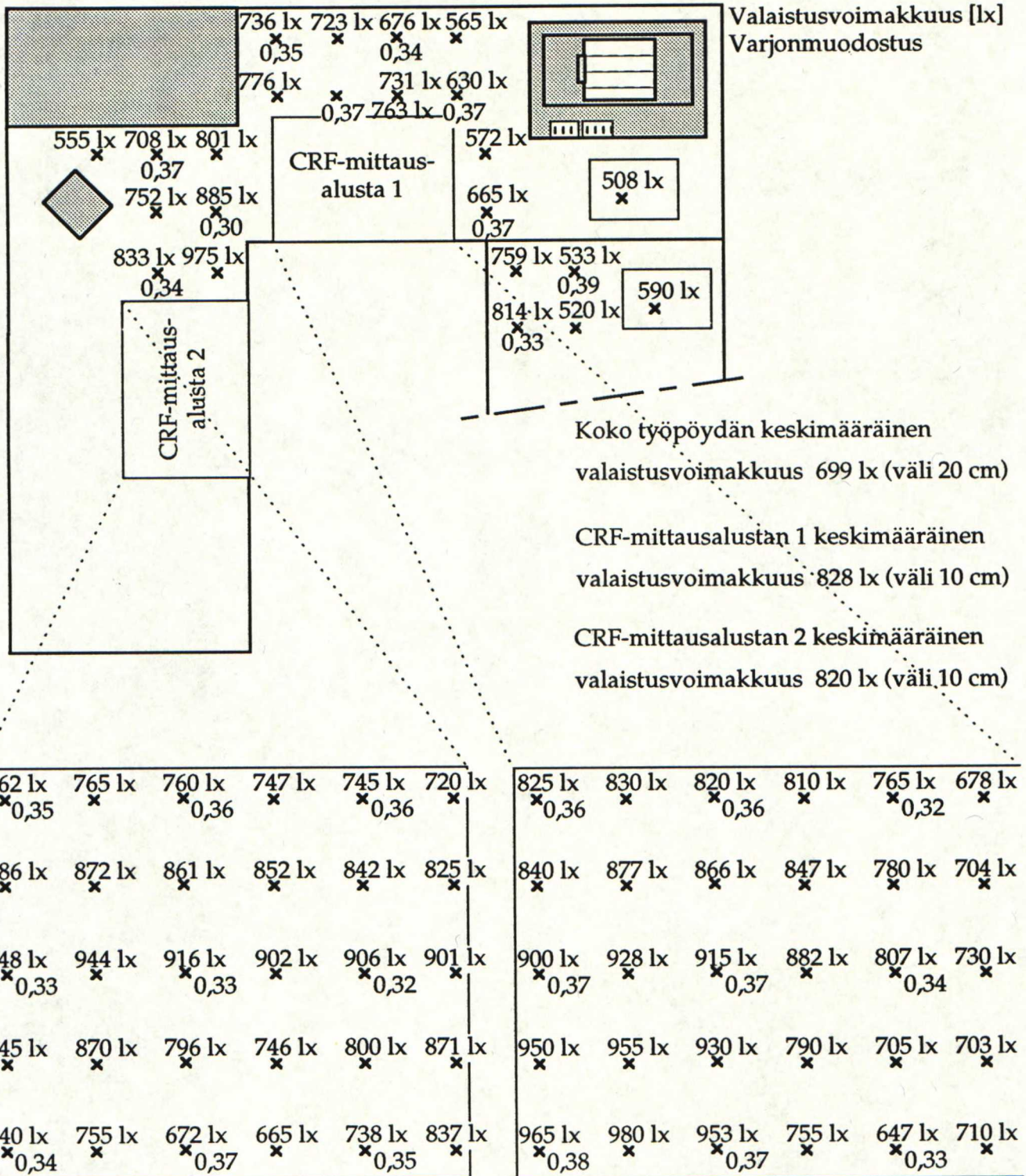


Keskimääräinen
yleisvalaistus-
voimakkuus
899 lx
(mittauskorkeus
0,75 m, väli 1 m)

Heijastussuhteet

-pöytä	0,28
-seinät	0,72
-katto	ei voitu mitata
-lattia	0,15

TKK
Opintotoimisto 28.04.94
Työpöytä



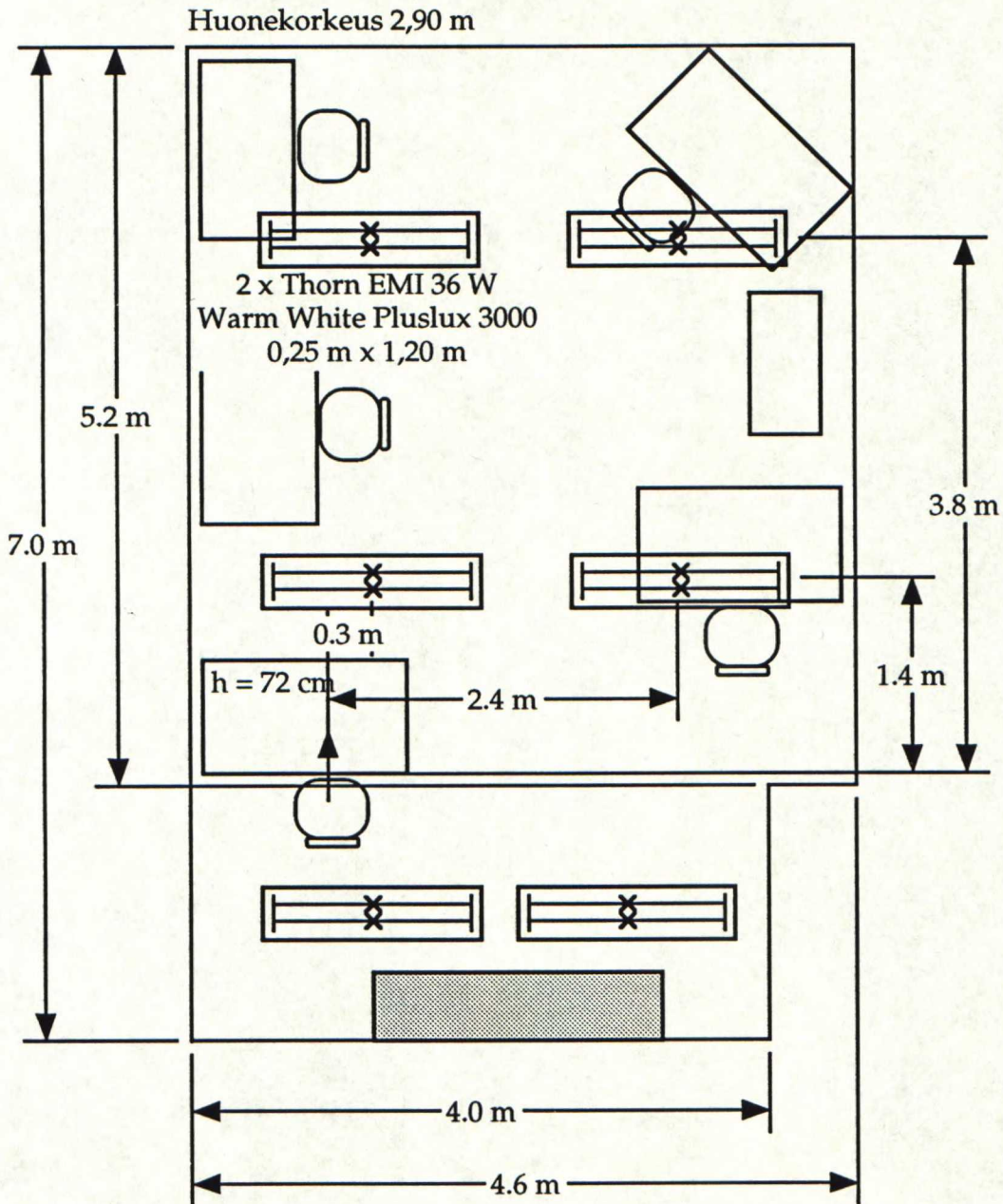
Näyttö

Näppäimistö

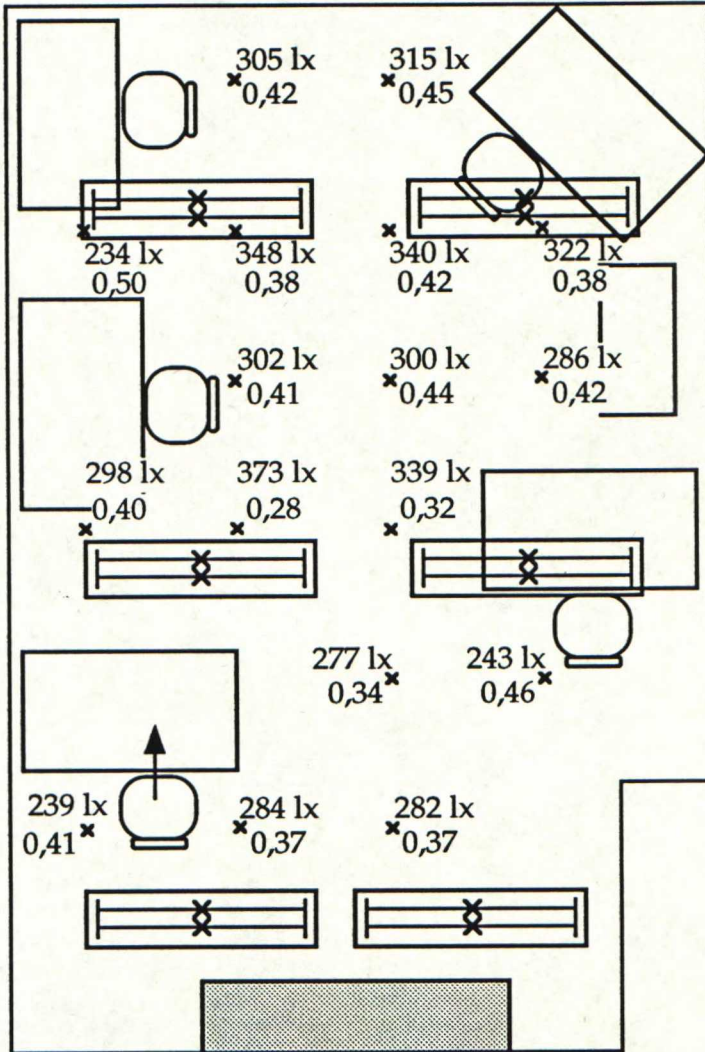
340 lx	345 lx	346 lx
315 lx	288 lx	301 lx

650 lx	728 lx	696 lx
832 lx	869 lx	876 lx

Näkövammaisten keskusliitto 17.05.94
Mitat



Näkövammaisten keskusliitto 17.05.94
Pohjapiirustus

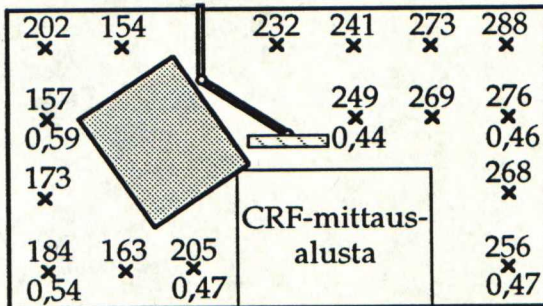


Keskimääräinen
yleisvalaistus-
voimakkuus
299 lx
(mittauskorkeus
0,75 m, väli 1 m)

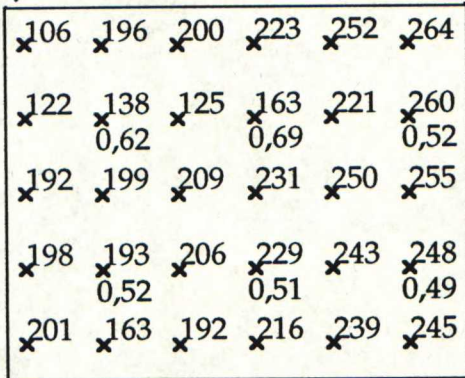
Heijastussuhteet

-pöytä	0,42
-seinät	0,72
-katto	ei voitu mitata
-lattia	0,30

Näkövammaisten keskusliitto 18.05.94
Työpöytä



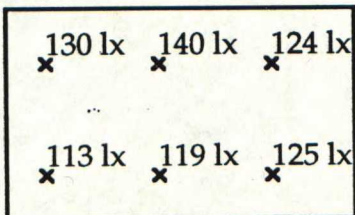
Valaistusvoimakkuus [lx]
Varjonmuodostus



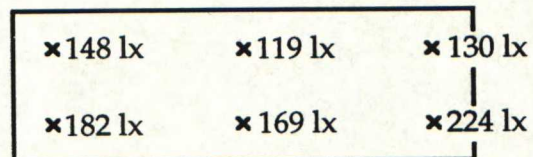
Koko työpöydän keskimääräinen
valaistusvoimakkuus 224 lx (väli 20 cm)

CRF-mittausalustan keskimääräinen
valaistusvoimakkuus 206 lx (väli 10 cm)

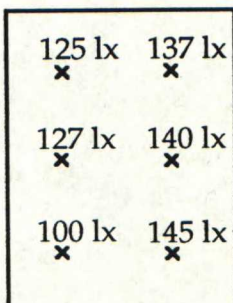
Näyttö



Näppäimistö



Lukuteline



Liite 4: Mittalaitteet ja mittausmenetelmät 1/3

LuminanssimittaritCapCalc-luminanssivideofotometri

Mittalaitteisto koostuu tietokonelaskentayksikköön liitetyistä kuvamonitorista ja videokamerasta.

Mittari mittaa lähes 250 000 pisteen luminanssit, joiden perusteella voidaan mitata, laskea ja esittää:

- yksittäisen pisteen luminanssi [cd/m^2]
- määrätyn alueen keskimääräinen luminanssi [cd/m^2]
- määrätyn kohteen ja taustan välinen kontrasti
- kohteen koko [sr]
- halutun alueen maksimi- ja minimiluminanssit [cd/m^2]
- erilaisia tilastosuureita (mm. hajonta)
- kuvamonitorin kuvaan määritetyt samaluminanssialueet
- suhteellinen näkötehokkuus RVP.

Halutut tutkittavat alueet voidaan määrittää kuvasta suorakulmaisen kehyksen avulla.

CapCalc-laitteistolla saavutetaan paljon etuja tavanomaisiin luminanssimittareihin verrattuna. Merkittävimmät edut ovat mittausnopeus, mittausalueen laajuus ja monipuolinen mittaustulosten analysointimahdollisuus.

Yhden kuvan ottaminen kestää 1/30 sekuntia ja jälkikäsitteily eli tietojen tallennus tietokoneen muistiin vie aikaa noin minuutin. Lyhin mittausetäisyys on 1 m ja matalin luminanssitaso $1 \text{ cd}/\text{m}^2$. Videokameran zoom on 12,5 ... 75 mm.

Tällä laitteistolla mitattiin valaisinten luminanssit kiusahäikäisymittauksissa sekä näkökentän keskimääräiset luminanssit sekä esto- että kiusahäikäisymittauksissa. Valmistajan lupauksista huolimatta avaruuskulman mittaaminen luotettavasti ei onnistu.

Liite 4: Mittalaitteet ja mittausten menetelmät 2/3

Minolta ft-1°

Mittari on pienehkö käsikahvalla varustettu ja jalustakiinnitteinen etsimellä varustettu luminanssimittari, jonka mittaussala on 1° ja lyhin mittausetäisyys on 1m.

Mittarissa on suoraluminanssimittaus ja -näyttö [cd/m^2].

Tällä mittarilla tehtiin tarkistusmittauksia CapCalcin mittaustulosten varmistamiseksi.

Spectra Pritchard Photometer + häikäisylinssi

Mittari oli VTT:ltä lainassa ja se on konventionaalinen luminanssimittari, jossa on erilliset kamera- ja kontrolliyksiköt. Luminanssinäyttö on viisarinäyttö. Mittari on VTT:n kalibroima.

Häikäisylinssinä käytettiin Glare Lens Attachment No. 68-20 1961 GL. Siitä aiheutunut korjauskerroin luminanssiarvoon oli 0,1065. Tämä arvo oli VTT:n määrittelemä.

Tällä mittarilla mitattiin ekvivalentti harsoluminanssi (L_{seq}) estohäikäisyn määrittämistä varten.

ValaistusvoimakkuusmittariLMT Pocket Lux

Pienikokoinen mittari koostuu laskentayksiköstä ja kaapelin päässä olevasta mittanturista. Mittarissa on digitaalinen näyttö.

Mittaria käytettiin valaistusvoimakkuuksien mittaamiseen työtasoilta ja samalta korkeudelta työtasojen ympäriltä (tilojen yleisvalaistusvoimakkuudet).

Mittausmenetelmät

Häikäisymittauksissa huoneissa oli normaali valaistus päällä ja suoran auringonvalon pääsy oli estetty sisään joko säleveroilla tai muilla tarkoitukseen varatuilla verhoilla mittausten aikana.

Ennen mittausten alkua valaistus oli päällä ainakin puoli tuntia. Samoin mittareiden annettiin lämmetä vähintään saman ajan.

Luminanssit mitattiin kaikilla mittareilla työpöydän ääressä istuvan keskimääräisen kokoisen työntekijän silmien kohdalta. Tällöin kameran linssin polttopisteen korkeus oli 115 cm lattiasta ja linssin uloin osa pidettiin vaakasuunnasta katsoen pöydän etureunan kohdalla. Optiikka tarkennettiin mittaushetken keskipisteeseen mahdollisimman tarkasti.

CapCalc-mittarissa käytettiin yleiskuvien ottamiseen (näkökentän keskimääräisten luminanssien määrittämiseksi) laajakulmalinssiä, joka puolitoistakertaisti kameran kuvan laajuuden. Valaisinten luminanssien mittaamiseen käytettiin normaalia linssiä ja zoomia niin, että valaisin peitti mahdollisimman suuren osan kuvasta. Kameran aukko valittiin siten, että taustan luminanssiksi tuli 0 cd/m^2 , jolloin saatiin luotettavimmat arvot korkeille luminansseille. Kaikki kuvat otettiin short-toiminnolla, koska long-toiminto estää kuvien monipuolisen käsittelyn ja tietojen analysoinnin.

Spectra Pritchard -luminanssimittaria käytettäessä piti kuva tarkentaa ennen häikäisylinssin kiinni ruuvaamista.

Valaistusvoimakkuudet mitattiin halutuista paikoista piste kerrallaan asettamalla mittarin anturi vuorotellen kuhunkin mittauspisteeseen ja kirjaamalla saadut tulokset paperille.

Muut suureet, kuten etäisyydet ja avaruuskulmat mitattiin mittanauhan ja luotilangan avulla ja saaduista mittaustuloksista edelleen laskemalla.

Liite 5: Kiusahäikäisymittausten tulokset 1/7

Mittaustaulukoiden apumuuttujien merkkien selitykset:

F	näkökentän keskimääräinen luminanssi [cd/m^2]
n	näkökentässä olevien valaisinten lukumäärä
x	valaisimen valaisevan osan leveys [m]
y	valaisimen valaisevan osan pituus [m]
A	valaisimen valaisevan osan pinta-ala [m^2]
L	valaisimen valaisevan osan keskimääräinen luminanssi [cd/m^2]
h	valaisimen keskipisteen korkeus katsojan silmästä [m]
l	valaisimen keskipisteen pitkittäissuuntainen etäisyys katsojan silmästä [m]
w	valaisimen keskipisteen poikittaissuuntainen etäisyys katsojan silmästä [m]
r	valaisimen keskipisteen suora etäisyys katsojan silmästä [m]
ω	valaisimen valaisevan osan avaruuskulma [sr]
τ, σ	sijaintikertoimen määrittävät kulmat [$^\circ$]
P	sijaintikerroin
Q	häikäisylähteen avaruuskulman funktio

Liite 6: Estohäikäisymittausten tulokset 1/4

Mittaustaulokoissa on esitetty Adrianin diagrammin jokaisen sektorin keskimääräiset luminanssit kussakin tilassa. Näiden perusteella on laskettu estohäikäisyä kuvaavat suureet ekvivalentti harsoluminanssi L_{seq} sekä kontrasti C_{seq} .

Lisäksi on esitetty CapCalcilla mitatut näkökentän keskimääräinen luminanssi L_b sekä näkökohteen keskimääräinen luminanssi L_t .

[illegible]

[illegible]

Liite 6: Estohäikäisymittausten tulokset 4/4

[illegible]